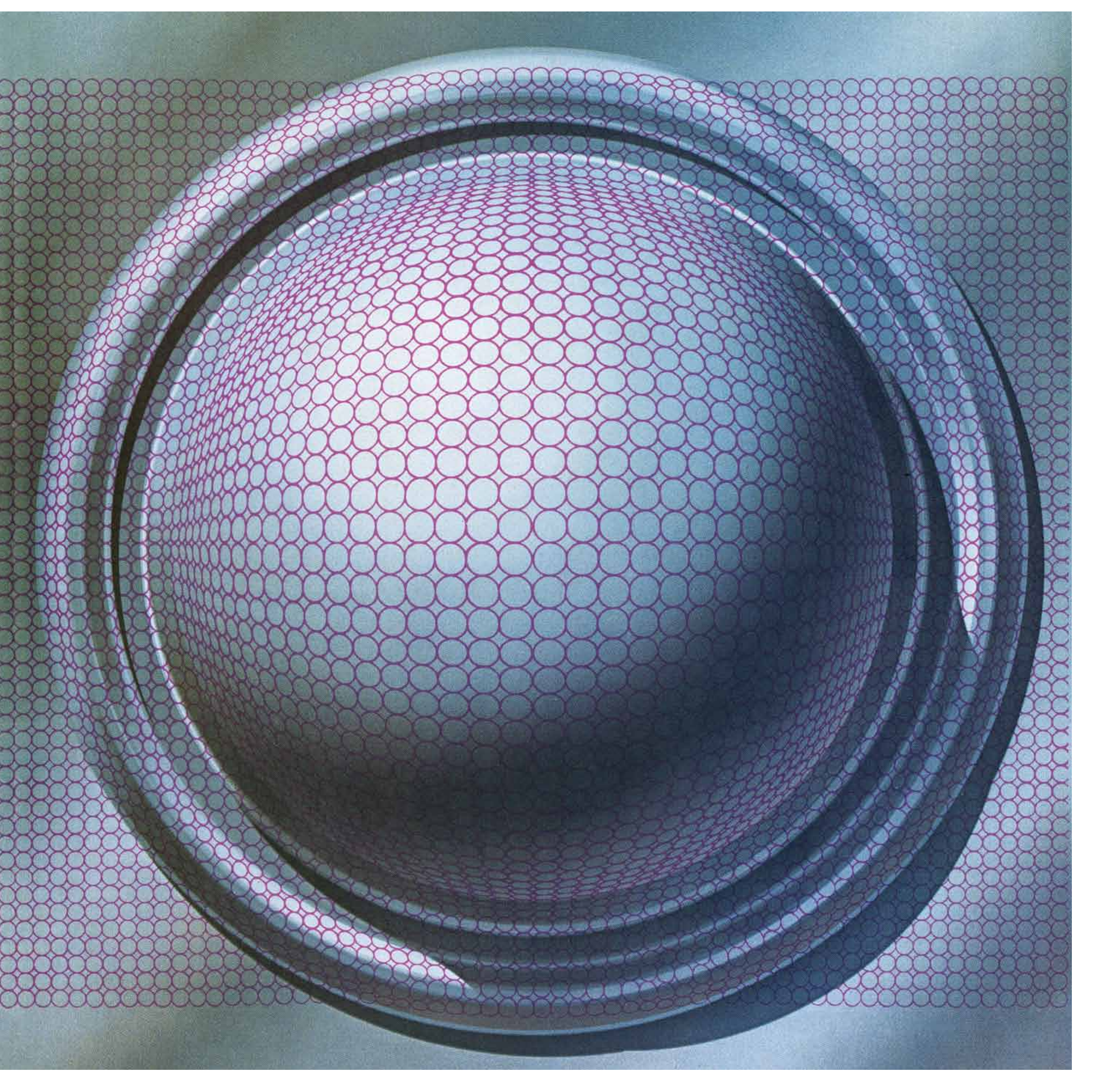
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



HECHURADO DE BANDAS METALICAS

Enero 1977

140 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 4
Enero 1977

INVESTIGACION Y CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR Francisco Gracia Guillén
REDACTOR JEFE José María Valderas Gallardo
PRODUCCION Manuel Estrada Herrero - Juan Navarro Alcaraz
PROMOCION Pedro Clotas Cierco

EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-15
ESPAÑA

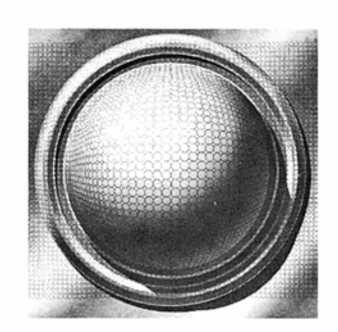
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Gerardo Espinosa: *Recursos mundiales y clase media;* Juan Olivar: *La guerra nuclear limitada;* Pilar Martínez: *Los procesos repetitivos en el desarrollo del niño;* Pedro Pascual: *El confinamiento de los quarks;* Miguel Gich: *Corrientes de convección en el manto terrestre;* Jordi Cuadras: *Células visuales en el puente cerebral;* Pere Molera: *Hechurado de bandas metálicas;* José M.ª Vidal: *Taller y laboratorio;* Enrique Trillas y Teresa Riera: *Juegos matemáticos.*

Libros:

Manuel García Doncel



LA PORTADA

La portada muestra un fragmento de una banda metálica, marcada por el método de plantilla de circunferencia y estructurada luego en forma de cúpula, estampada en una prensa (véase "Hechurado de bandas metálicas" en este número). El metal es un acero suave del tipo usado en las factorías automovilísticas; antes de la estampación medía unos 15 cm. cuadrados, y los círculos constaban entonces de unos 2,5 milímetros de diámetro. Después de la estampación, el cambio en la medida de los círculos afectados por la misma proporciona la medida de la cantidad de deformación que sufre cada sección de la lámina. El método de plantilla de circunferencia sirve, por tanto, para comprobar la calidad del metal, al poder registrar las fuerzas de formación y control de la estampación. La forma de cúpula se logró en un proceso de laboratorio llamado prueba de taladro con estirado, en la cual un taladro hemisférico deforma el metal para comprobar la capacidad de estirado en la estampación.

Suscripciones:

Prensa Científica, S.A.
Departamento de suscripciones
Calabria, 235-239
Barcelona-15 (España)

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49
Barcelona-10 (España)

Distribución para los restantes paises:

Editorial Labor, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-15 (España)

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 1.540 pesetas
Seis meses (6 números): 800 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números); 30 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
160 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
225 pesetas.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Diseño de la cubierta por Ted Lodigensky

Página	Fuente	Página	Fuente
5-11	Lorelle M. Raboni	73-76	George V. Kelvin
16	U.S. Air Force	78	Carol Donner
17-25	Total Comm. Ind. Ltd.	79	Alan R. Gibson
29-37	Emilio Herrera	80	Carol Donner
41-42	T. G. R. Bower	81	Andrew Christie
43	Alan D. Iselin	82	Alan R. Gibson Carol Donner
44-46	T. G. R. Bower	83	Carol Donner Andrew Christie
47	Alan D. Iselin		
48-49	T. G. R. Bower	84	Andrew Christie Carol Donner
53-65	Andrew Christie		
67	Frank Richter	89-90	General Motors Corp.
68-71	George V. Kelvin	81-95	Dan Todd
72	Frank Richter	96	Ralph Morse

Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición: Fort, S.A.
Rosellón, 33 - Barcelona-15
Impresión: Cayfosa
Ctra. de Caldas, Km 3,700
Sta. Perpetua de Moguda - Barcelona.
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

NATHAN KEYFITZ ("Recursos mundiales y clase media") enseña demografía y sociología en la Universidad de Harvard. Se graduó en 1934 en la Universidad de McGill, en donde se especializó en matemáticas. Trabajó en estadística para el Dominion Bureau of Statistics, en Ottawa, mientras obtenía su Ph. D. en sociología en 1952, por la Universidad de Chicago. Se incorporó a la docencia en 1959, al ser nombrado profesor de sociología en la Universidad de Toronto. Ha escrito varios libros, entre ellos *Introduction to the Mathematics of Population* (1968).

SIDNEY D. DRELL y FRANK VON HIPPEL ("La guerra nuclear limitada") son físicos de las Universidades de Stanford y Princeton, respectivamente. Drell es profesor, subdirector y jefe del departamento de física teórica del Stanford Lineal Accelerator Center. Preside el High Energy Physics Advisory Panel of the High Energy Research and Development Administration (ERDA). Trabaja en Stanford desde 1956, a los siete años de haberse doctorado en física por la Universidad de Illinois. Von Hippel es investigador del centro de estudios del medio ambiente, de Princeton. Después de doctorarse en la Universidad de Oxford, en 1962, pasó a trabajar como investigador asociado al Instituto Fermi, de la Universidad de Chicago. Formó parte posteriormente de los departamentos de física de la Cornell University y de Stanford, y ha trabajado en el Lawrence Radiation Laboratory de la Universidad de California y en la división de física de alta energía del Argonne National Laboratory. Drell y Von Hippel han podido colaborar en su artículo gracias a sus respectivas relaciones con la Office of Technology Assessment.

EMILIO HERRERA ("Metabolismo de los glicéridos en el tejido adiposo") es catedrático y Jefe del Departamento de fisiología general de la Facultad de Biología de la Universidad de Barcelona. Durante el curso 1965-66 trabajó como becario postdoctoral de la Fundación Juan March en el Thorndike Memorial Laboratory de la Harvard University Medical School, Boston, Mass., y los cursos 1966-67 y 67-68, en la Northwestern University Medical School de Chicago, Ill., en el Departamento dirigido por el Profesor Norbert Freinkel, sobre diversos aspectos de la regulación del metabolismo intermediario. Su línea de investigación actual se relaciona con las variaciones en las interrelaciones carbohidratos y grasas en hipo e hipertiroidismo, diabetes, preñez y lactancia en la rata, con especial atención a las alteraciones del metabolismo de glicéridos en tejido adiposo.

T. G. R. BOWER ("Procesos repetitivos en el desarrollo del niño") es actualmente profesor visitante de psicología en la Universidad libre de Bruselas. Se graduó en la Universidad de Edimburgo en 1963, y recibió su Ph. D. por la Cornell University en 1965. Trabajó en Harvard sobre problemas de percepción, desarrollo ontogenético y filogenético y comportamiento animal. En 1969 volvió a Edimburgo, en donde entró a formar parte del departamento de psicología.

YOICHIRO NAMBU ("El confinamiento de los quarks") es director del Departamento de física de la Universidad de Chicago. Nacido en Japón, se licenció y doctoró en física por la Universidad de Tokyo. En 1952 fue invitado al Institute for Advanced Study en Princeton. A propósito de lo cual ha escrito: "Fue el momento decisivo de mi vida, porque he permanecido en Estados Unidos desde entonces". Estuvo dos años en este Instituto antes de pasar a la facultad de Chicago.

D. P. McKENZIE y FRANK RICHTER ("Corrientes de convección en el manto terrestre") son geofísicos de la Universidad de Cambridge y de la Universidad de Chicago, respectivamente. McKenzie es director adjunto de investigación en el Departamento de geodesia y geofísica de Cambridge. Desde que obtuvo su Ph. D. en esta última universidad ha permanecido repetidas veces en el Scripps Institute of Oceanography, en el Instituto de Tecnología de California, en el de Massachusetts y en la Woods Hole Oceanographic Institution. Durante el año en curso ha sido elegido miembro de la Royal Society. Richter es profesor adjunto de geofísica en Chicago, donde obtuvo su Ph. D. en 1972. Pasó como investigador asociado al M.I.T. Durante 1974-1975 fue becario de la fundación Guggenheim, antes de incorporarse a la facultad de Chicago.

MITCHELL GLICKSTEIN y ALAN R. GIBSON ("Células visuales en el puente cerebral") trabajan en el Laboratorio de Psicología Walter S. Hunter de la Brown University. Glickstein enseña psicología en esta Universidad; es investigador del Departamento de fisiología de la Universidad de Oxford. Doctorado en psicología por la Universidad de Chicago trabajó en el Instituto de Tecnología de California y en la Universidad de Stanford. "Mi interés principal", escribe, "se centra en la estructura y la función del cerebro y sus relaciones para la coordinación visual de los movimientos." Gibson trabaja en la Brown University como investigador después de doctorarse en la Universidad de Nueva York.

S. S. HECKER y A. K. GHOSH ("El hechurado de bandas metálicas") trabajan en la sección de metalurgia de Los Alamos Scientific Laboratory y Science Center of the Rockwell International Corporation, respectivamente. Se conocieron en el Research Laboratories de la General Motors Corporation, en donde estaban investigando el tema, fruto de cuyo esfuerzo es la mayor parte del artículo. Hecker trabajó en los laboratorios de la General Motors de 1970 hasta 1973. A partir de entonces ha estado investigando en Los Alamos. Ghosh entró a formar parte del Physics Department de la General Motors Laboratories en 1972 después de graduarse (Ph. D.) en metalurgia y mineralogía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Se graduó en 1966 en la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Calcuta.

ERRATA

Número 3, diciembre de 1976

Pág.	*columna*	*línea*	*dice*	*debe decir*
11	2	7	cinco casos por habitante	cinco casos por 100.000 habitantes
20	2-3	28-1	Si el electrón tiene	Si el fotón tiene

Recursos mundiales y clase media

Desarrollo económico significa ingreso en la clase media mundial, de elevado índice de consumo. Ante los límites impuestos por los recursos mundiales, el ritmo de ingreso puede acelerarse tan sólo por nuevos conocimientos científicos y técnicos

Nathan Keyfitz

Dónde está la cota máxima del desarrollo económico, cabe preguntarse. El planeta y sus materiales son finitos; ni su censo de 4000 millones de personas puede vivir como lo hacen los estadounidenses, ni mucho menos los seis u ocho mil millones que, según las tendencias actuales, habiten la tierra cuando se establezca una población mundial estacionaria. Se llega incluso a dudar de que la población norteamericana prevista para el año 2000, que constará de 250 millones de habitantes, pueda vivir como lo hacen los estadounidenses hoy. ¿Hasta dónde podrá extenderse, entonces, la sociedad industrial por entre el mundo preindustrial antes de alcanzar el tope impuesto por el espacio, las materias primas y la eliminación de los residuos?

Ese planteamiento de la problemática sería erróneo, si el conocimiento humano y la capacidad de reemplazo y la elasticidad de los sistemas económicos no tuvieran límite, como bien pudiera ocurrir. En tal caso, la pregunta correcta –y la más asequible y pragmática– sería: ¿con qué *rapidez* puede avanzar el desarrollo, tienda o no a un límite definitivo? ¿Qué ritmo de innovación técnica puede alcanzarse, que esté orientado de modo que permita velocidad correlativa en la ampliación de la industria, y a cuántos miembros de la población mundial permitirá esa ampliación ingresar, cada año, en la clase media?

La posesión del tren de vida propio de la clase media constituye el objetivo del desarrollo en países tan alejados geográfica e ideológicamente como Brasil y la Unión Soviética. En el camino hacia ese logro, los campesinos acceden a la enseñanza, se desplazan a las ciudades, se ocupan en trabajos urbanos y adoptan pautas urbanas de consumo. Se producen cambios en la gente misma, en el lugar donde viven, en su tipo de trabajo y en la naturaleza de los bienes de consumo. Estos cambios pueden visualizarse a través de una línea definible, comparable con la línea de pobreza trazada oficialmente en los Estados Unidos y que la gente aspira a cruzar. Las preguntas pertinentes vienen a ser entonces las siguientes: ¿Cuánta gente cruza esa línea cada año, cuál es la incidencia de este grupo en los recursos, a qué ritmo pueden ampliarse, mediante nuevas técnicas, los recursos y, por consiguiente, cuál es la amplitud del marco que los pobres del mundo tendrán que atravesar para llegar hasta la clase media en lo que queda de siglo, y en adelante?

Uno de los temas principales del desarrollo, para muchos habitantes de Asia, Africa y Latinoamérica, consiste en cómo ensanchar ese ventanal que da hacia la clase media. Como, según un punto de vista generalmente aceptado, es la gente de clase media la que pone límites a su familia, la velocidad del movimiento de entrada en dicha clase ayuda a conocer el nivel en el cual puede estabilizarse la población mundial; ese nivel determinará, a su vez, el grado de bienestar que puede ser sostenido por los recursos del mundo. Y si la escasez de recursos hace que la abertura de entrada a la clase media sea tal como está hoy constituida, es decir, tan estrecha que la mayoría jamás podrá pasar a través de ella, entonces cuanto antes lo sepamos tanto mejor será. En cuyo caso, quizá la gente habrá de conformarse con el modelo chino de desarrollo y no con el brasileño-ruso.

Las preguntas que he planteado son difíciles de responder por muchos motivos, entre los que se cuenta la carencia de información estadística, la incertidumbre acerca de la capacidad de los sistemas productivos para reemplazar las materias escasas por otras comunes y los interrogantes sobre las direcciones en las que progresará la tecnología. Sin embargo, se cuenta con algunos datos y ciertos indicadores de rumbo.

Comencemos por la demografía. La población mundial, según los cálculos de las Naciones Unidas a los que me atendré, superó la cifra de 4000 millones en 1975. Había sobrepasado la de 3000 millones en 1960. Mientras que los últimos 1000 millones se sumaron en 15 años, los primeros 1000 millones habían costado contabilizarse desde la aparición (hace uno o dos millones de años) hasta 1825. El crecimiento ha sido más rápido que el exponencial a una tasa fija de incremento (tal como el del interés compuesto); la tasa aumentó desde algo así como una media de 0,001 por ciento anual, a lo largo de los milenios de la prehistoria, hasta el 1,9 por ciento, a través de los tres lustros comprendidos entre 1960 y 1975.

Al parecer, la tasa de incremento ya no se elevará más. Ese mismo 1,9 por ciento, según la variante media de la ONU, se mantendrá hasta 1990, y, a finales de siglo, el aumento descenderá al 1,6 por ciento anual *(véase la ilustración de la página 6)*. Otros cálculos sitúan antes el valor máximo y aceleran el declive de la tasa de incremento. Para lo que valga de consuelo, la tasa de incremento continuo constituía una "explosión" demográfica, en tanto que ahora estamos descendiendo hasta "solamente" un crecimiento exponencial. (Este valor de cresta era inevitable si atendemos al motivo que, en primer lugar, ocasionó el aumento: la disminución de la mortalidad en los recién nacidos y en los niños. La disminución de la mortalidad a partir

de la adolescencia no afecta mucho al incremento y, a la larga, no lo afecta en absoluto. En cuanto las posibilidades de supervivencia de un recién nacido se elevan a un 90 por ciento aproximadamente, se limita el panorama para nuevos incrementos, y todo aumento que ocurra quedará compensado con una disminución, aunque sea pequeña, de la tasa de natalidad.)

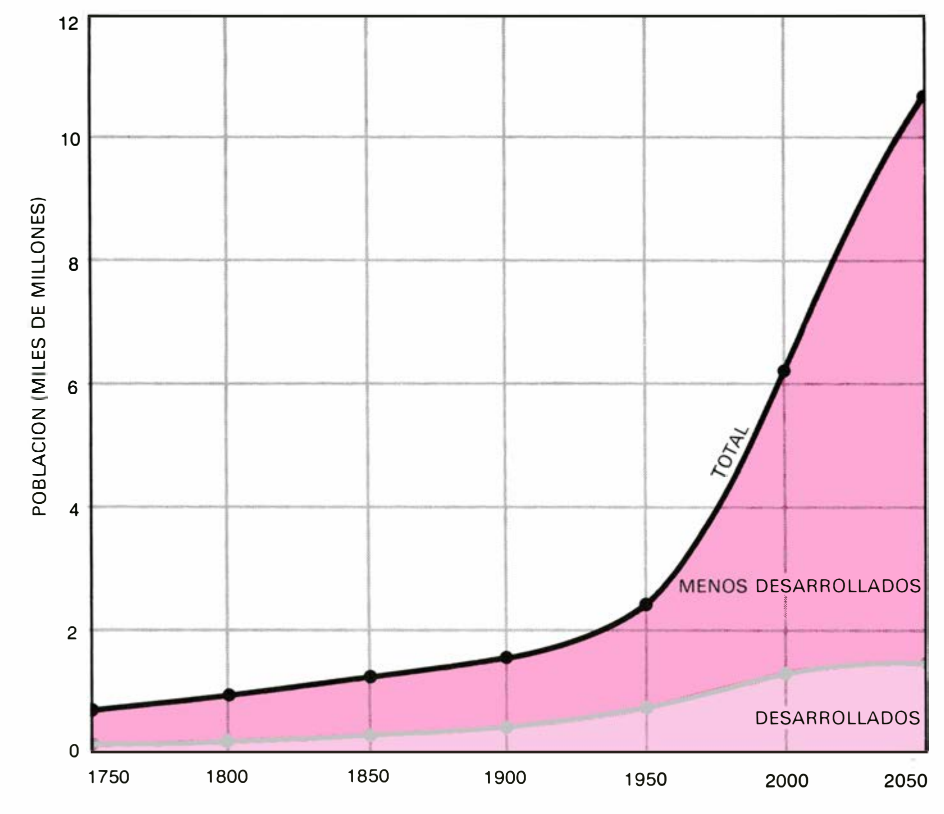
Quienes se preocupan por la explosión demográfica podrán tranquilizarse un tanto al saber que la tasa de incremento ha alcanzado ya su valor máximo, pero no mucho. El bajar a un crecimiento exponencial significa que la población mundial continúa aumentando (según la variante media de la ONU) en alrededor de 75 millones por año, ahora; incremento anual que se elevará a 100 millones hacia finales de siglo. Y lo que parece importar es el aumento absoluto, más que la tasa de crecimiento. Para alimentar el incremento anual actual se precisan casi 20 millones de toneladas más de cereales por año, cantidad mayor que la cosecha canadiense de trigo y más o menos igual a las cosechas de Argentina, Australia y Rumanía juntas. Abastecer el incremento anual de población, partiendo siquiera de una base mínima, va a ser bastante difícil. Sin embargo, el verdadero asunto no consiste en cuánta gente pueda subsistir, sino cuánta puede vivir bien.

La producción de la mayoría de las cosas que consume la población mundial ha ido aumentando a una tasa mayor que el 1,9 por ciento anual del crecimiento demográfico. Durante el período 1960-1973, la producción de carne aumentó a razón de 2,8 por ciento anual, la de papel de prensa en 3,7 por ciento, los vehículos a motor en 6,8 por ciento y el consumo de energía en 4,9 por ciento; hubo un aumento parecido en otros muchos bienes. Podría entenderse que estos números significan que, como promedio, la humanidad está, año tras año, comiendo mejor y leyendo más, adquiriendo más movilidad y substituyendo el trabajo muscular por el de las máquinas. Tal conclusión parecería verse confirmada por las cifras mundiales sobre productividad o ingresos. Por ejemplo, sumando los productos nacionales brutos de todos los países en 1970, se obtiene un producto bruto mundial de 3,219 billones de dólares, es decir, una media de 881 dólares per cápita. El total ha ido subiendo a razón de casi un 5 por ciento anual en cifras reales, es decir, después de haber descontado la subida de los precios. Teniendo en cuenta el 1,9 por ciento de aumento de la población, estaríamos mejorando individualmente, al parecer, en un 3 por ciento anual aproximadamente. Proyectando sobre esta base, los bienes efectivos per cápita se duplicarían cada 23 años; cada generación sería dos veces más opulenta que la precedente. El disponer del doble de riqueza que los propios progenitores y el cuádruple que los abuelos no puede juzgarse insatisfactorio; a tenor de tales cifras, el mundo parece estar encaminándose hacia la opulencia. Esta conclusión exige profundas correcciones.

El dividir un número total de dólares por un número de personas para obtener una media per cápita tiene una larga tradición; el dividir un número por otro es una operación inocente y sin implicación necesaria de que todo el mundo reciba esa cifra media; induce, sin embargo a ciertas suposiciones generalizadas. La primera suposición podría ser que, realmente, las cosas no irían mal con unos ingresos de 881 dólares per cápita por parte de toda la población (conclusión conservadora). La segunda suposición sostiene que no irían mal en absoluto si se dividiese efectivamente el total (un punto de vista extremista proclamado con frecuencia estos últimos años). Pero el ingreso es un aspecto del modo de vida, y sólo una parte nimia del modo de vida es transferible.

La falacia de estas reparticiones se ve potenciada al expresar el ingreso en dinero y al realizar una división aritmética. Decir que deberíamos dividir el ingreso de manera que cada individuo reciba sus 881 dólares, es resolver un problema real con un truco verbal o aritmético; porque detrás de los números está el hecho de que los estadounidenses viven de una manera y los bengalíes de otra. Si, a partir de mañana, los estadounidenses empezaran a vivir como los bengalíes, el mayor ingreso de los primeros desaparecería simplemente. No habría nada que transferir.

La capacidad de transferencia depende de la medida en que los estadounidenses pudiesen consumir como bengalíes al tiempo que continuasen produciendo como estadounidenses. Simon Kuznets y otros han señalado que, apenas uno intenta programar una transferencia, el estrecho vínculo entre producción y consumo frustra la pretensión. Por ejemplo, al coste de trasladarse al trabajo se le llama consumo, pero si la



LA CURVA DE LA "EXPLOSION DEMOGRAFICA" es el resultado de un crecimiento inferior al exponencial; la tasa anual de incremento ha venido aumentando, más acusadamente en el siglo pasado, debido en gran parte a la reducción de la mortalidad infantil. En este gráfico, se muestra la población total (proyectada hasta el año 2050 según el cálculo intermedio de la ONU) en relación con los países clasificados por la ONU como "desarrollados" *(representado en el color claro)* **y "menos desarrollados"** *(en el color oscuro).*

gente dejase de viajar a sus trabajos, la producción decaería hasta cero. ¿Y qué pasa con el coste de vacaciones y ocios, que son elementos del consumo, pero refrescan a la gente para nuevos trabajos? ¿Y la nutrición, la educación y los servicios médicos? ¿Y el disfrute de bienes de consumo que constituyen el incentivo para trabajar y ganar dinero? Todas estas partes del consumo y otras muchas realimentan la producción. Además, hablar de inmensas transferencias de capital resultaría ocioso por motivos políticos aun cuando fuese económicamente práctico: la evolución negativa del presupuesto de ayuda exterior de los EE. UU. muestra cuán poco atractiva es esta senda hacia el desarrollo mundial para el donante principal.

No hay ningún estilo de vida que guarde relación con esa media mundial de 881 dólares, por cuanto la población mundial es heterogénea. El seguir ese promedio a lo largo del tiempo lleva a la errónea impresión de que las cosas van mejorando de año en año y que así ocurrirá indefinidamente. El mismo desglose en dos partes del promedio es un importante paso hacia la realidad.

De la población mundial total de 4000 millones calculada en 1975, 1130 millones, o casi el 30 por ciento, vivía en países desarrollados. El porcentaje con que estos países contribuyen al crecimiento demográfico anual es, empero, mucho menor, a saber: sólo 10 de entre los 75 millones, es decir, el 13 por ciento. El incremento anual en los países menos desarrollados supera los 65 millones, y alcanzará los 90 millones a finales de siglo (siempre según el cálculo intermedio de la ONU). La división del mundo en dos clases de países, ricos y pobres, se ha popularizado desde la Segunda Guerra Mundial. El producto (o ingreso) mundial per cápita de 881 dólares en 1970 resultaba, en efecto, de una media de 2701 dólares para los países desarrollados y de una media de 208 dólares para los menos desarrollados.

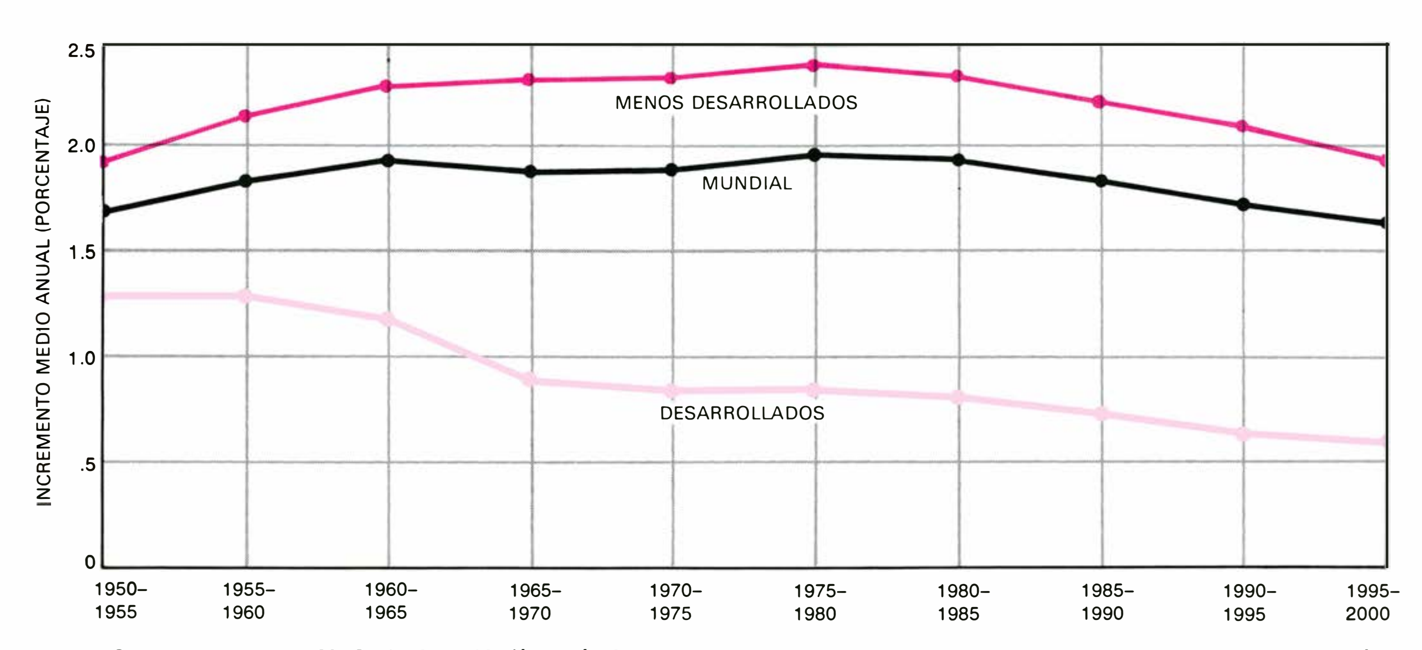
Las fluctuaciones recientes restan precisión a las tasas de incremento a largo plazo. Supongamos, sin embargo, que la tasa de ingreso crece, en los países pobres y en los ricos, a razón de un 5 por ciento anual a largo plazo. En el aspecto demográfico, imaginemos que el incremento fuera de 0,5 por ciento anual en los países desarrollados y de 2,5 por ciento en los menos desarrollados. Permitiendo que estos incrementos demográficos consigan el 5 por ciento anual, el aumento del producto total supuesto para ambos desciende a un 4,5 por ciento en los países desarrollados y a sólo un 2,5 por ciento en los menos desarrollados.

La consecuencia de esto es una brecha creciente entre ambos grupos de países, que se resuelve como un ejercicio matemático de incremento geométrico *(véase la ilustración de la pág. 7).* Pongamos que los países desarrollados parten de un ingreso de 2701 dólares per cápita y lo aumentan a razón de 4,5 por ciento anual en cifras reales. Al cabo de 25 años, lo habrían triplicado, llegando a un ingreso per cápita de más de 8000 dólares en el año 1995. Para entonces, los ingresos per cápita de los otros países no se habrían duplicado siquiera; sus 208 dólares se habrían elevado a sólo 386 dólares. Para el año 2020, los nietos de la actual generación dispondrían, en el primer grupo de países, de más de 24.000 dólares cada uno, y, en el otro grupo, la cifra, bastante modesta aún, de 715 dólares $-^{1}/_{34}$ del ingreso de los ricos– ¡y ni siquiera la media mundial de 1970!

El cálculo muestra cómo una población heterogénea tenderá a crear una brecha creciente entre ricos y pobres si se congelan las tasas de incremento per cápita. He supuesto que todos los ingresos nacionales aumentarían un 5 por ciento anual. El crecimiento del ingreso nacional global no es señaladamente diferente, como promedio, entre pobres y ricos, de modo que las diferencias decisivas son las del crecimiento demográfico.

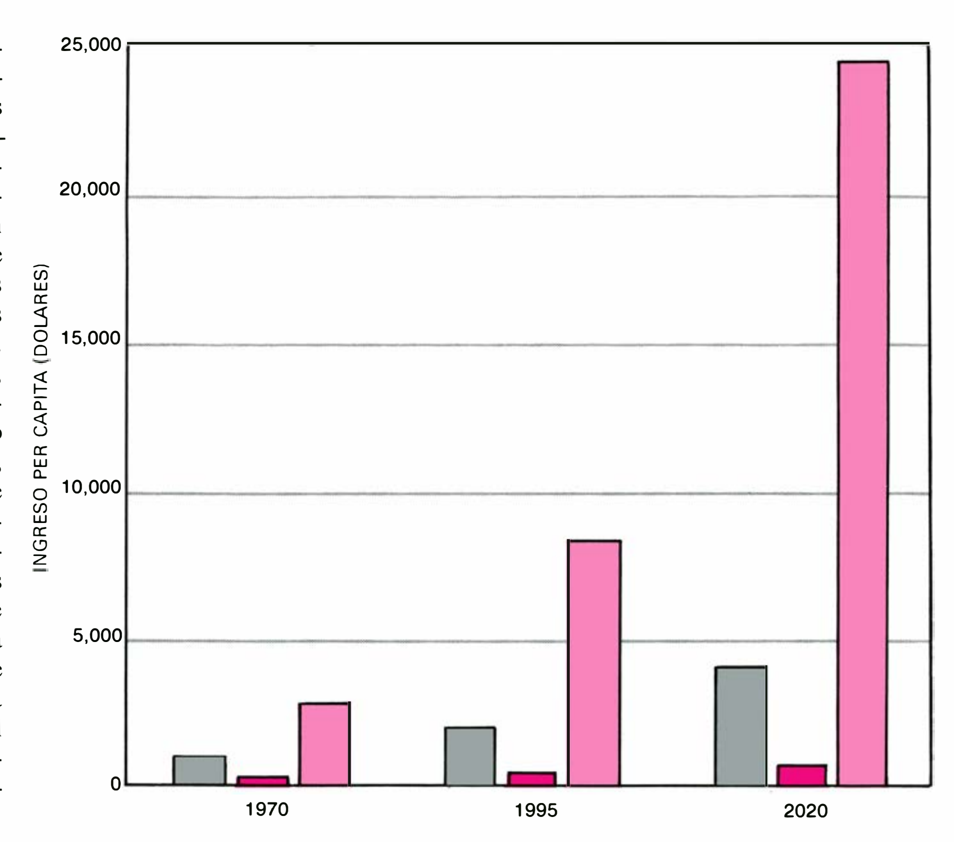
Hablar de países desarrollados y menos desarrollados es un adelanto respecto a la consideración del mundo como algo homogéneo, pero los hechos de los tres últimos años han dejado anticuada esa división. Antes bastaba con dos categorías de países, hoy no podemos emplear menos de cuatro.

Los cambios de precios en las materias primas han creado países ricos en recursos como Abu Dhabi y Venezuela, cuya riqueza es comparable a la de los países



LA TASA DE CRECIMIENTO de la población está alcanzando al parecer su cota máxima en este lustro. Se ha trazado la tasa media de incremento anual mediante intervalos de un lustro para los países desarrollados *(color claro)*, menos desarrollados *(color oscuro)* y para el mundo en su totalidad *(negro)*. La tasa de crecimiento inició su descenso hace varias décadas para los países desarrollados y pronto se registrará en los menos desarrollados. La "explosión" está terminando, dado que el aumento de la población no llegará a una proporción exponencial.

desarrollados, a los que se les puede denominar ricos en capital para diferenciarlos. Algunos países que eran pobres han ido desarrollándose, como ha ocurrido con Singapur, Corea, Taiwan y Hong-Kong. Finalmente, están los países verdaderamente pobres que carecen (en relación con su población) de capital y de recursos. Tenemos, por tanto, los países ricos en recursos, los ricos en capital, los en vías de desarrollo y los países pobres. Identificar y clasificar, específicamente, todos los casos a fin de establecer la población correspondiente a cada grupo no es fácil. (Indonesia posee recursos, pero no los suficientes como para que algún alza probable de los precios hiciese rica a su población de 135 millones.) Las nuevas categorías de países ricos en recursos y países en vías de desarrollo podrían definirse de manera que cada una sumase 200 millones de personas; queda en pie el hecho de que la mayor parte de la población mundial vive en países que carecen de peso económico por control de capital o por control de recursos.



LA BRECHA CRECIENTE entre los ingresos per cápita en los países desarrollados y menos desarrollados se debe a que el aumento de población es más rápido en los países pobres. Las cifras de la ONU para los países desarrollados *(color claro)*, para los menos desarrollados *(color oscuro)* y para el mundo en su totalidad *(gris)* se proyectaron suponiendo que el ingreso total habría de continuar aumentando a razón del 5 por ciento anual en ambos grupos de países, pero la población de los países desarrollados aumenta en sólo 0,5 por ciento, mientras que la de los menos desarrollados aumenta a razón de 2,5 por ciento.

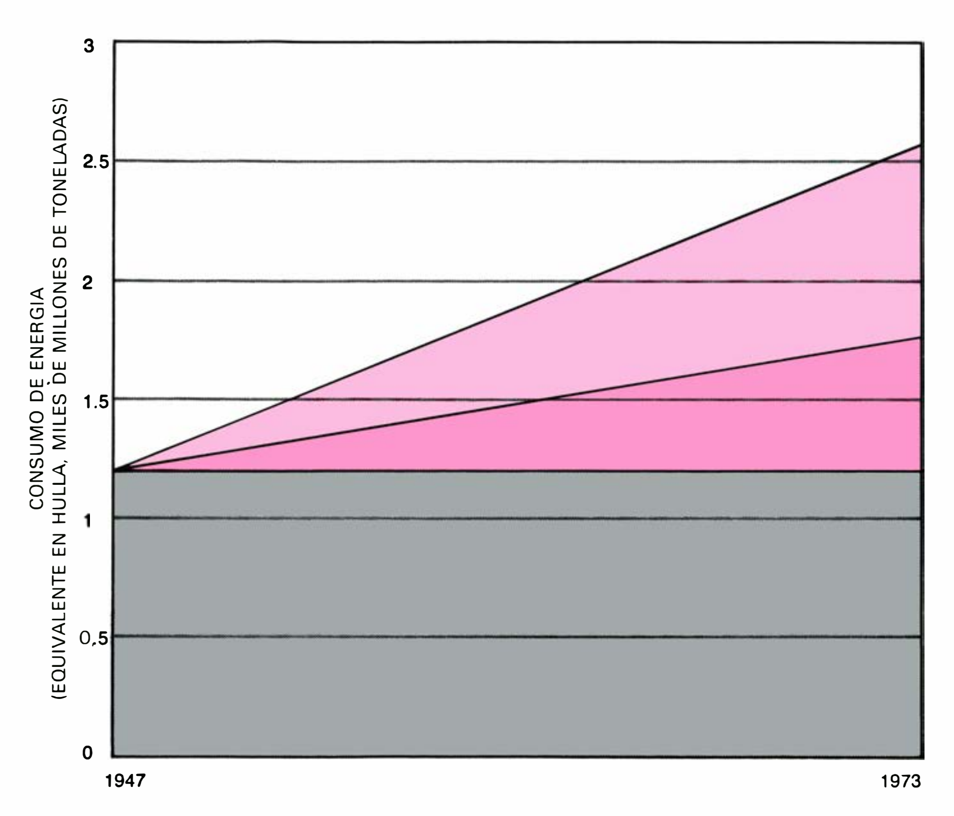
No hay ningún país que sea homogéneo. En los países más pobres hay personas ricas, y en los más ricos hay personas pobres. Las naciones y sus gobiernos dominan tan completamente nuestra época que los individuos escapan de la consideración tanto política como económica; sin embargo, el bienestar de los gobiernos no constituye ningún objetivo final válido; es la gente de los países pobres la que merece nuestra preocupación. Por consiguiente, en adelante, nos ocuparemos, de la forma más directa posible, de la gente.

Resulta fácil representarse un pobre típico y un individuo típico de clase media. El primero puede ser un campesino de Java, de Nigeria, del nordeste de Brasil o de cualquier otro lugar de Asia, Africa o América; el segundo es un ciudadano de San Francisco, Frankfurt, Leningrado o Tokio, con un trabajo administrativo que lo sitúa muy por encima de la línea de pobreza. Existen representantes menos definidos. Asociado al grupo campesino podría contarse como pobres al asalariado de Calcuta y al desempleado de cualquier ciudad norteamericana. Por su parte, en el grupo de clase media se incluye al albañil, al conductor de autobús, al revisor y al agricultor afortunado de Estados Unidos, Europa, Rusia o Japón; el que a algunos de ellos se les considere como de clase obrera es secundario respecto de que obtengan un ingreso de clase media.

En todas las encuestas, cuando a los estadounidenses se les pregunta a qué clase creen pertenecer, se sitúan a sí mismos en la clase media. Esta autoclasificación por la cual la mayoría de los estadounidenses tienden a autodenominarse como de clase media y los bengalíes como pobres concuerda con el distingo que he señalado. La mayoría de los individuos pertenecientes a la clase media viven en las ciudades de países ricos, pero algunos viven en países pobres y, otros, en el campo. La diferencia crucial estriba en que la gente de clase media están en posición de reclamar efectivamente una parte de los recursos mundiales que concuerde con la vida moderna.

Al medir el bienestar con el baremo de los ingresos, la gente entra en un espectro continuo y el emplazamiento de la línea de pobreza se torna arbitrario. Conforme se va enriqueciendo un país, se hacen más exigentes sus normas, de manera que un mismo porcentaje de su población puede seguir definiéndose como "pobre" aun cuando cada uno de los habitantes vaya progresando. No obstante, en los Estados Unidos se ha podido llegar a un amplio consenso sobre la definición de pobreza, hecha por la Administración de Seguridad Social y fundada en criterios relativamente objetivos. Se dice que una familia urbana media de cuatro personas, con dos niños, precisa 3700 dólares anuales (a los precios de 1974) para pagar el alquiler, comprar ropa y satisfacer las necesidades básicas de nutrición; para otros tipos de hogar se han fijado niveles parecidos.

La expresión "clase media" describe un estilo de vida, y puede abarcar no sólo necesidades físicas sino también necesidades convencionales tales como segadoras de motor de césped y vacaciones de invierno en la montaña. Hay que definirla por separado para cada cultura antes de observar cuántos individuos disfrutan de dicho estilo y cuáles son las consecuencias, medidas en energía y recursos, de ese disfrute. Mientras aparece un estudio al respecto, entenderé por clase media el conjunto de personas que están por encima del equivalente a la "línea de pobreza" fijada en Estados Unidos, vivan donde vivan. Las diferencias culturales impiden que la pobreza en un país sea intrínsecamente comparable con la pobreza en otro, pero hacen igualmente no comparables los ingresos medios en dinero. El empeño por cuantifi-



EL CONSUMO DE ENERGIA EN ESTADOS UNIDOS habría aumentado de 1210 millones de equivalente hulla en 1947 a 1770 millones de toneladas en 1973, si tan sólo hubiese ido a la par del aumento de población. En realidad, el consumo de energía se elevó a 2550 millones de toneladas en 1973. El incremento *(color claro)* **debido a un aumento en el consumo per cápita, proveniente de la opulencia, fue mayor que el incremento** *(color oscuro)* **imputable al crecimiento de población. Lo mismo cabe decir para otros muchos materiales.**

car nociones importantes no debe verse obstaculizado por cierto grado de diferencia cualitativa; el porcentaje situado bajo el nivel de consumo representado por la línea de pobreza patrón de los Estados Unidos no es la manera definitiva de medir cuántos pobres hay en el mundo, pero nos servirá mientras tanto. En Estados Unidos, esa fracción era del 11,6 por ciento en 1974, lo que suponía un incremento respecto del 11,1 por ciento en 1973, pero un descenso respecto del 22,4 por ciento de 1959. De los 250 millones de estadounidenses en 1973, unos 23 millones vivían en la pobreza; llamemos de clase media a los 187 millones restantes. Intentemos hallar índices que proporcionen cifras correlativas para otros países.

El número de coches de turismo en uso podría considerarse como proporcional, a grandes rasgos, a la población de clase media o al número de quienes están por encima de la línea de pobreza. En Estados Unidos había, en 1973, 101 millones de coches, y, en el resto del mundo, 233 millones, es decir, una proporción de 2,3. En la medida en que los turismos están conducidos y usados por una clase media mundial, podemos multiplicar la clase media estadounidense de 187 millones por 2,3, obteniendo un total mundial de 430 millones de personas de clase media. Este número es demasiado pequeño, porque los coches constituyen una parte menor de la vida cotidiana, incluso en otros países ricos; en Europa continúa usándose el tren para muchos tipos de desplazamientos que en Estados Unidos se efectúan en automóvil.

Tomemos como índice el teléfono. En 1973, el total mundial de aparatos era de 336 millones, siendo de 138 millones el total estadounidense. Según este indicador, la clase media mundial se componía de 187 millones por el resultado de la proporción 336/138, o sea, de 455 millones. Usando como índice la energía eléctrica, un cálculo parecido da una clase media mundial de 580 millones. Cada índice de éstos tiene sus fallos. No obstante, cabe esperar que los defectos de los mismos sean más o menos constantes a lo largo de un período de unos 20 años, al que voy a ceñirme para definir una tendencia.

Una manera algo diferente de realizar el cálculo es considerar que la vida moderna requiere unas cuatro toneladas métricas de petróleo crudo por año para calefacción, aire acondicionado y fuerza motriz, de modo que la producción mundial en 1973, a saber, 2774 millones de toneladas, pudo satisfacer las necesidades de 700 millones de personas (el cálculo es aproximado porque algunas personas pobres consumen poco petróleo en tanto que se emplean grandes cantidades para fines militares y otros usos gubernamentales).

Promediando estos diversos índices, se deduce que había, en 1970, una clase media mundial compuesta por 500 millones de personas. Lo que resulta importante es que la media correspondiente –usando como índices los automóviles, los teléfonos, la energía eléctrica, el petróleo y otros artículos– fue de unos 200 millones para 1950. Esto indica un incremento medio de 4,7 por ciento anual de la clase media mundial; los trabajadores, y sus familias, que están integrados en la sociedad industrial, usan sus materiales como base de sus trabajos y emplean sus ingresos para consumir su producción. Al hacerlo, inciden en los recursos y en el medio ambiente. ¿Cuál es, exactamente, la repercusión del cambio de categoría –el pasar de pobre a clase media– especialmente en comparación con el efecto del cambio demográfico?

Las materias primas son aprovechadas por la gente, y así, si todo lo demás queda fijo, el consumo de recursos tendrá que ser proporcional al tamaño de la población. Si cada año la población mundial crece en 1,9 por ciento respecto al año anterior, y no hay ningún otro cambio, cada año habrá 1,9 por ciento más de personas que exploten los recursos; al cabo de 37 años, tendremos, en promedio, doble densidad por unidad de superficie y estaremos consumiendo el doble de hierro y otros metales y el doble de petróleo crudo. Esta afirmación no vale para la contaminación, en donde intervienen otros factores de variabilidad superior a la proporcional. Resulta cierta para los recursos si la tecnología de producción y los moldes de consumo permanecieran constantes.

Pero la realidad es que no permanecen constantes, y ejercen efectos en direcciones opuestas. La tecnología ha ido intensificando y ampliando el uso de los materiales. Ahora sabemos poner el estaño sobre la lata con un menor espesor; podemos fabricar caucho y telas a partir de la hulla; reciclamos el aluminio. La tendencia, guiada por los cambios de precio, es siempre hacia materiales menos escasos. Pero conforme suben los ingresos, aumenta el consumo per cápita: se gasta más comida enlatada, con la peculiaridad de que cada lata o bote lleva una capa más fina de estaño. Lo que es peor todavía, se inventan nuevos

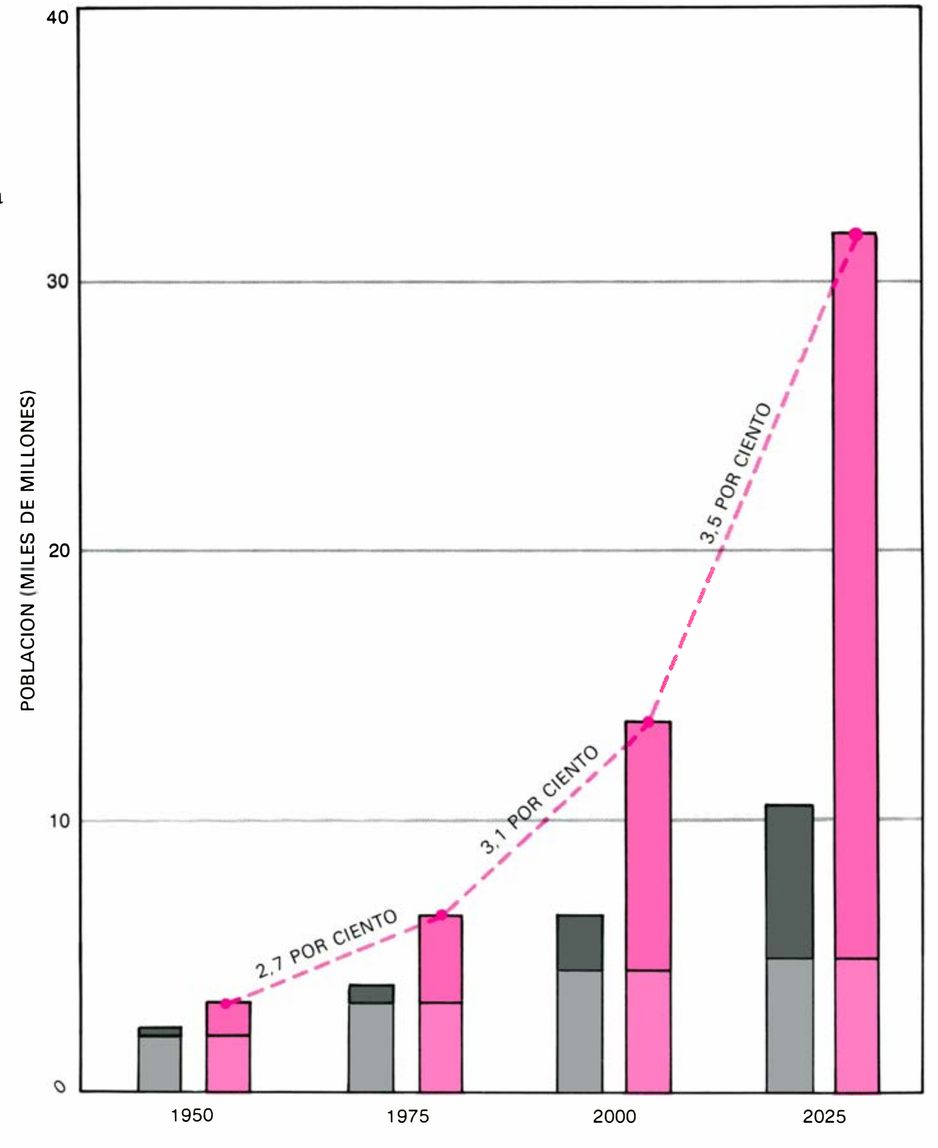
materiales –detergentes, plásticos, insecticidas– que tardan muchísimo tiempo en reingresar en los ciclos de la naturaleza una vez desechados. Es necesario calcular el efecto neto de esas tendencias.

El efecto neto del mayor consumo per cápita y de los adelantos tecnológicos se obtiene, según un método, a partir de la determinación del cambio residual, es decir, tras descontar lo debido al aumento de población. Abordemos dicho efecto respecto al consumo de energía en los EE.UU. en 1947 y 1973. En 1974, se consumieron 1210 millones de toneladas de equivalente hulla, siendo de 2550 millones el consumo en 1973. Entretanto, la población había pasado de 144 millones a 210 millones. Si la mayor población de 1973 se hubiese atenido al mismo volumen y a los mismos patrones de consumo y producción que la de 1947, habría necesitado 1770 millones de toneladas de equivalente hulla. Del incremento total de 1340 millones, sólo 560 millones se debieron al crecimiento de la población; el resto del incremento, 780 millones, se debió a la opulencia. Esta fue más importante que la población *(véase la ilustración de la pág. 8)*. Puede realizarse unos cálculos parecidos respecto de metales y otros materiales, de la contaminación, del contenido calórico primario de los alimentos, y, de hecho, respecto de todo tipo de efecto susceptible de medición.

Como otra manera de analizar el consumo de materiales, considérese que entre 1950 y 1970 la parte de la población mundial con una vida holgada pasó de 200 millones a 500 millones de personas; mientras la población total aumentó a razón de 1,9 por ciento anual, los grandes consumidores de clase media crecieron a razón de 4,7 por ciento. Cada gran consumidor requiere el equivalente de 750 kg de cereales, mientras el pobre se las arregla con 250 kg. (La relación consiguiente de uso de la tierra es menor que 3:1, porque la agricultura es más eficiente en los países ricos.) La persona de clase media necesita de 15 a 30 barriles de petróleo, mientras la persona pobre se las arregla con un barril a lo más en forma de queroseno, combustible de autobús y fertilizante. La relación rico/pobre en lo referente a tierra y a contenido energético de la vestimenta quizá sea intermedia entre las relaciones correspondientes a alimento y a transporte. A manera de media de estas diversas relaciones, supongamos que el efecto de la persona de clase media sobre la base material es el quíntuple del de la persona pobre. En tal caso, a la persona media situada por encima de la línea de pobreza debe considerársele como equivalente a cinco personas situadas bajo dicha línea en cuanto al consumo de combustibles y metales. Al considerar las repercusiones calculamos por consiguiente como si, en 1975, habitaran el planeta no 4000 sino 6400 millones de personas. De éstas, 3400 millones eran pobres, y 3000 millones representaban la repercusión quíntuple de una clase mundial que contaba probablemente con 600 millones de personas.

Según esto, la repercusión o el efecto medio total de la pequeña clase media en los recursos, sería algo menor que la ocasionada por el gran número de pobres. Pero la clase media ha ido aumentando un 4,7 por ciento anual, y, los pobres, a menos de la mitad de esa tasa. En los límites del crecimiento, el aumento de la opulencia o buen pasar tiene un efecto mucho mayor que el aumento de población; el desplazamiento de personas hacia la clase media tiene un efecto mayor sobre los materiales y el medio ambiente que el aumento numérico de pobres.

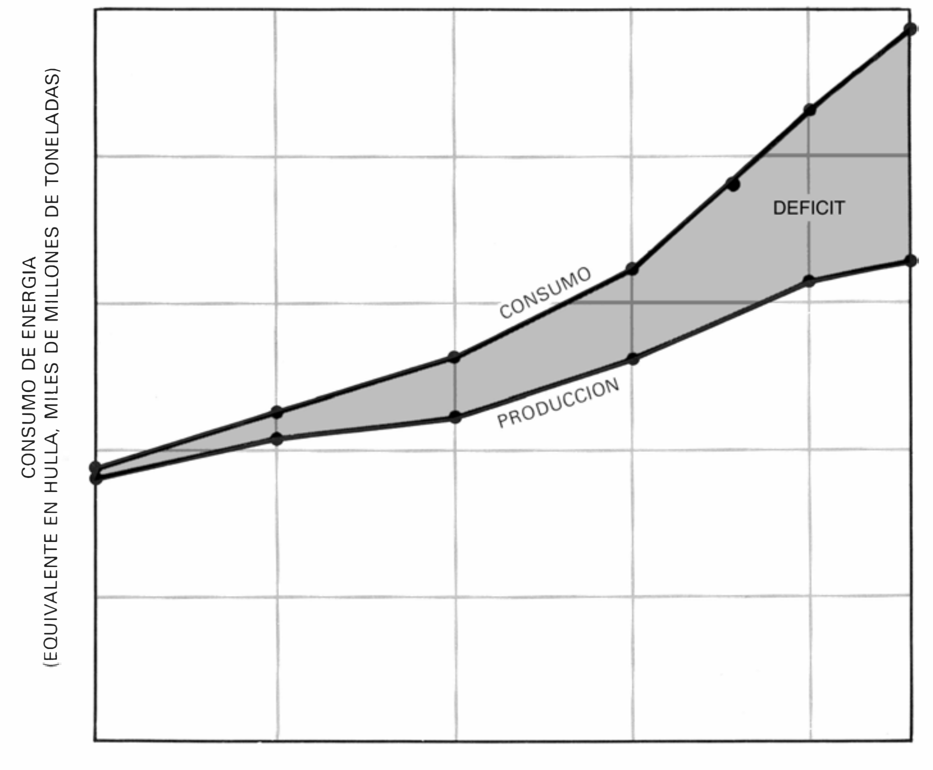
Su efecto es, en verdad, tan grande que si la explosión demográfica está terminando ahora (en el sentido de que la tasa mundial de aumento está llegando a su tope de 1,9 por ciento anual y comienza a declinar), nos habremos de enfrentar a otra explosión. Esta procede del cálculo aritmético de conjugar dos exponenciales, o sea, dos progresiones (aumento de población y aumento de la clase media), cada una de las cuales posee una relación fija.



LA REPERCUSION FUTURA sobre los recursos mundiales se ve afectada por el crecimiento de la clase media, cuyos miembros consumen, se supone, cinco veces más que la gente pobre. En población tan sólo, la clase media *(gris oscuro)*, aumentando a razón de 4,5 por ciento anual, sería eventualmente mayor que la población pobre *(gris claro)*. Cuando a la clase media se la multiplica por cinco, la "población consumidora" resultante *(color)* crece, como puede verse, a un ritmo anual que aumenta de 2,7 a 3,1 y, luego, a 3,5 por ciento. Los recursos mundiales se vieron apremiados ya por la "población consumidora" en 1975.

El efecto puede expresarse de una manera esquematizada, a saber, suponiendo que la población de 1975, de 4000 millones, se proyectara hacia adelante con la razón 1,6 cada 25 años (equivalente a la tasa fijada de 1,9 por ciento anual). Supóngase al mismo tiempo que la clase media se triplique cada 25 años (equivalente a un 4,5 por ciento anual fijo), como lo hizo de 1950 a 1975. La población pobre se deduce de la diferencia entre los números resultantes. Si el efecto medio de la gente situada sobre la línea de pobreza es cinco veces el impacto de los situados bajo ella, para obtener la repercusión total debemos agregar al número de pobres cinco veces el número de individuos pertenecientes a la clase media. El resultado es una tasa de incremento que crece continuamente para dicha repercusión, desde un 2,7 por ciento anual, en 1950-1975, a 3,1 por ciento y luego a 3,5 por ciento *(véase la ilustración de la pág. 9)*. Para lo cual se parte de la hipótesis que continúen las tasas de desarrollo económico y crecimiento demográfico del período 1950-1970. El crecimiento demográfico se frenará, pero ello no reducirá mucho los efectos en los recursos que, conforme a dicha ilustración, se iría debiendo cada vez más a la opulencia. Las dificultades que tenemos para mantener los niveles de población y opulencia de 1976 ponen de manifiesto la no viabilidad de tal modelo. No podemos contar con seguir triplicando la clase media cada 25 años. El motivo principal es la escasez de recursos.

Los recursos naturales representan sólo el 5 por ciento del valor de los bienes y servicios producidos en Estados Unidos y otros países desarrollados. Por consiguiente, curiosamente, los recursos tienen dos aspectos: su extracción representa tan sólo una pequeña fracción del coste, y, sin embargo, son el *sine qua non* de la existencia, por no hablar del progreso. Y ciertos materiales se agotan. La Revolución industrial inglesa fue, en parte, la reacción ante una crisis de falta de leña: la leña, que había llegado a ser escasa y muy cara, fue reemplazada por hulla barata. En cambio, en Norteamérica, la madera era barata y el trabajo caro; por tanto, las casas se construían de madera como material preferente a la piedra, que consume más mano de obra. En nuestros días, la madera resulta también costosa en Norteamérica y, para algunos usos, es sustituida por el cemento, los ladrillos y el aluminio. Los plásticos reemplazan al papel en los embalajes. Se cultivan pinos especiales para producir papel de imprenta que hagan las veces de las limitadas cantidades de pinos y abetos de los bosques del norte.



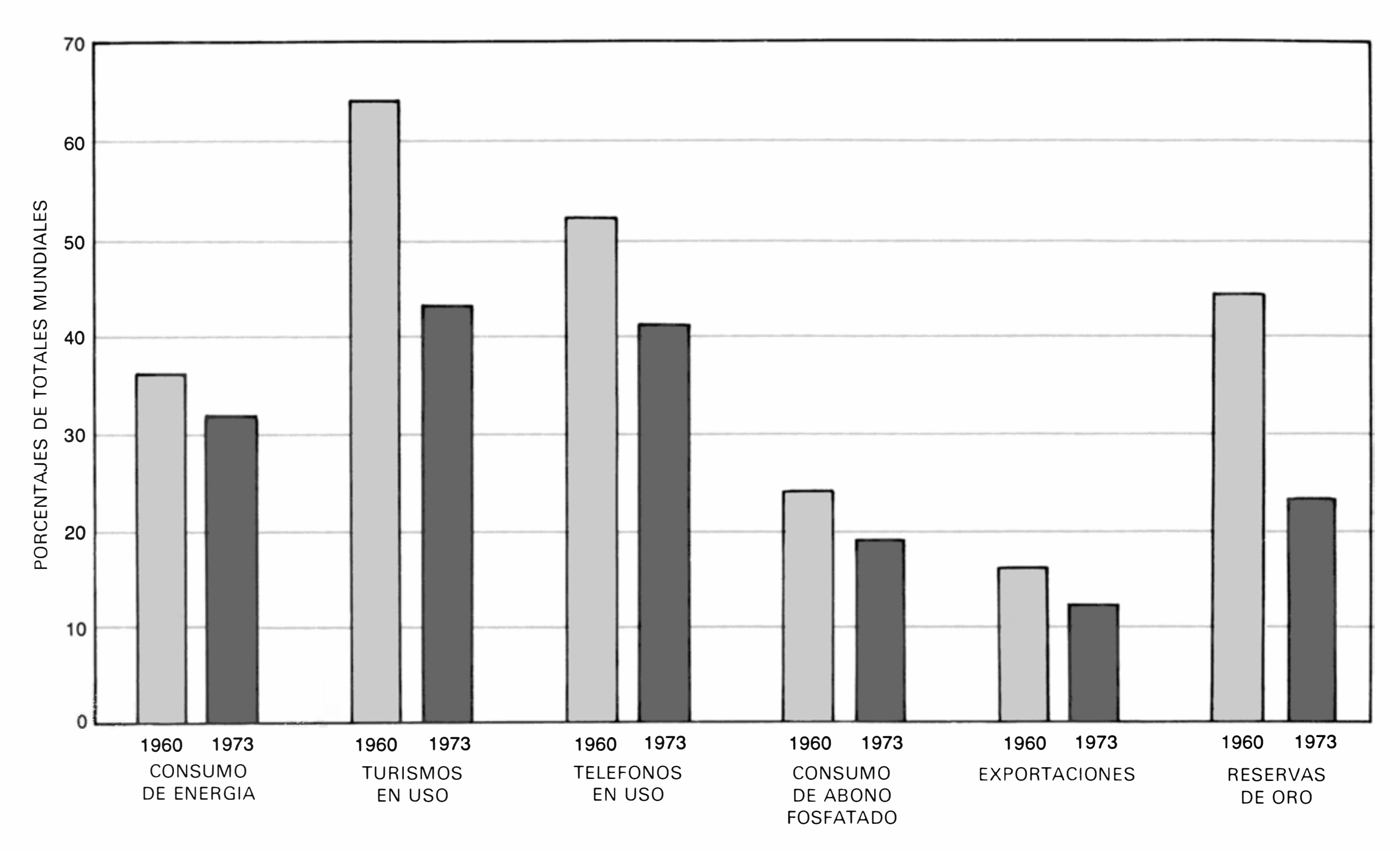
EL CONSUMO Y LA PRODUCCION de energía estaban casi equilibrados en 1950 en los países desarrollados. Estos producían hulla, petróleo, gas y potencial hidráulico cuya energía consumían, excepto un pequeño déficit compensado por importaciones procedentes de países menos desarrollados. Hace unos años, hacia 1973, la producción creciente había sido aventajada por el consumo; el déficit alcanzó entonces un tercio del total del consumo.

La historia muestra así la reciedumbre del sistema productivo, su capacidad para reemplazar materiales escasos por otros más comunes. No obstante, al extrapolarse esta capacidad es preciso tener en cuenta el tiempo. La invención, la innovación y el reemplazo de capital pueden producirse sólo a cierto ritmo. Hay que estudiar ese ritmo de innovación, puesto que fija la tasa a la cual puede desplegarse la sociedad industrial frente a las limitaciones que imponen el medio ambiente y los recursos.

Los límites para el despliegue de la sociedad industrial bajo la tecnología quedan apuntados por el historial del comercio de materias primas durante el último cuarto de siglo. Así, por ejemplo, en 1950 la producción y el consumo de energía estaban prácticamente equilibrados para el conjunto de los países desarrollados. Su déficit no alcanzaba el 4 por ciento del consumo. Hacia 1973, la producción registrada en los países desarrollados se había casi duplicado, pero el consumo lo había sobrepasado con largueza y el déficit se había abultado hasta llegar a ser un tercio del consumo.

Por lo que respecta a los metales y a otros recursos, la historia no es muy diferente. Ningún país, desarrollado o no, ha sido dotado por la naturaleza con una mayor cantidad y variedad de recursos minerales y de otra especie que lo ha sido Estados Unidos. Ahora bien, Estados Unidos se había convertido también en importador neto de minerales hacia la segunda década del siglo; en la actualidad importa la totalidad de su platino, mica y cromo, el 96 por ciento de su aluminio, el 85 por ciento de su amianto, el 77 por ciento de su estaño y el 28 por ciento de su hierro por mencionar tan sólo algunos artículos de una larga lista. Ciertamente, la escasez de algunos de estos minerales no es absoluta sino que está regida por los precios. Así, Estados Unidos podría producir todo el aluminio que necesita a partir de sus propias arcillas, pero la bauxita de Jamaica es más barata. Habiendo prácticamente agotado el mineral de hierro de Mesabi Range, Estados Unidos recurre a taconitas nacionales de más baja ley y a importaciones, en una proporción determinada por los precios.

El incremento de más de un 4 por ciento anual en el número de personas de clase media que han aparecido en escena es excesivamente acelerado, por cuanto estos grandes consumidores han de rastrillar el mundo en busca de recursos, pero, por otra parte, es muy lento como para satisfacer a los miles de millones de individuos que esperan a la puerta. Mien-



EL AUMENTO DE LA OPULENCIA fuera de los Estados Unidos, especialmente en Japón y Europa, ha reducido las fracciones excesivas en el consumo de energía, en bienes no perecederos y de otros índices de riqueza que correspondían a los Estados Unidos. Este efecto se ampliaría si hubiese más gente que saliera de su nivel de pobreza y traspasara los umbrales de la tasa media de la renta per cápita mundial.

tras Europa, Japón y la Unión Soviética han realizado grandes avances durante las Décadas de Desarrollo de la ONU, la mayor parte de Asia y Africa está insatisfecha con los progresos experimentados. Además, un cálculo realista mostraría probablemente una brecha mayor entre la repercusión que sobre los recursos tienen quienes lograron levantarse sobre la pobreza y quienes perviven todavía en la pobreza. El peso de una persona de clase media es, en muchos aspectos, más de cinco veces mayor que el de un campesino. Esta proporción de cinco a uno, y el que la clase media mundial se triplique cada 25 años, son supuestos que he planteado a fin de mantener mi argumento dentro de lo prudencial.

La conjugación de estos dos modestos supuestos produce, como hemos visto, una medida sorprendentemente elevada de la repercusión que se observará a finales del siglo, para cuando la clase media, que era de 600 millones en 1975, habría aumentado a 1800 millones y produciría el efecto de cinco veces ese número, o sea de 9000 millones. La repercusión total proyectada para el año 2000 resulta, pues, de 9000 millones, más 4600 millones de pobres, o sea 13.600 millones de personas. Esto puede compararse con el efecto ocasionado por los 6400 millones calculados de igual manera para 1975. Si ya se evidencian tensiones en cuanto a materiales y a energía, ¿qué ocurrirá al duplicarse la tasa de consumo?

La repercusión creciente que se presenta al reconocer dos categorías de gente en vez de una queda compensada en cierta medida por la disminución en la repercusión por dólar de ingreso, una vez que éste se eleva más allá de cierto nivel. Las personas con ingresos elevadísimos los dedican más bien a servicios que a multiplicar su número de automóviles. Además, la relación repercusión/ingreso varía de una cultura a otra, como lo señalaría un antropólogo; un economista agregaría que podemos contar con que dicha relación cambiará conforme las materias primas, y por tanto los bienes hechos de ellas, escaseen y se encarezcan en comparación con formas de consumo que ocupen menos materiales. Si bien la repercusión sobre los materiales puede reducirse con una riqueza mayor, la repercusión sobre el aire y el agua puede sobrepasar la relación de proporcionalidad. Quizás existan umbrales; tal vez el aire pueda contener una determinada proporción de monóxido de carbono y un lago una determinada afluencia de fertilizante sin que se produzcan efectos indebidos, pero, traspasado un cierto punto crítico, la repercusión puede resultar catastrófica. Tales puntos críticos obviamente existen en los recursos renovables. La pesca o la tala de árboles hasta determinada intensidad no produce daño alguno, pero una pesca o una tala pertinaz pueden destruir la población piscícola o forestal.

El ritmo y la dirección del desarrollo del período 1950-1970, por insatisfactorios que puedan ser en cuanto que el número absoluto de pobres continuaría aumentando hasta bien entrado el siglo XXI, van, sin embargo, más a prisa de lo que puede sostenerse conforme a las estrategias actuales. Puede contarse con que la reciedumbre del sistema económico, y en especial la innovación técnica, respondan a las necesidades, pero sólo a un cierto ritmo. Cabe imaginar que las fuentes de energía, la capacidad de eliminar desechos y los sucedáneos de metales se dupliquen, todos ellos, en el siglo que viene; pero no es fácil concebir dicha duplicación en los quince años que habrían de mantener a la clase media creciendo a razón de 4,7 por ciento anual.

Afirmar que la civilización sufrirá un colapso cuando se agoten los suministros de petróleo, o que nos autoeliminaremos por contaminación, es negarle al sistema productivo toda reciedumbre y capacidad de reacción. El geólogo o el experto en recursos tiende a fijarse en el

material y en el proceso técnico que conoce, pero quizás sea menos imaginativo respecto de cómo podría hallarse un sucedáneo para paliar una escasez. Por otra parte, quizá el economista sea demasiado imaginativo, quizá suponga alegremente que puedan hallarse sucedáneos para cualquier cosa en cuanto ésta comience a agotarse. El consiguiente debate entre los pesimistas expertos en materias primas y los economistas llenos de optimismo ha puesto sobre el tapete los conocimientos que poseemos sobre el tema. El punto medio hacia el cual convergen ambos flancos es que todas las barreras a las que se está enfrentando ahora la expansión industrial pueden vencerse mediante el progreso tecnológico, pero no en un instante. No se trata, pues, de poner un techo a la población total y al ingreso total, sino ensanchar esa ventana. ¿Cuál es el máximo tamaño que puede dársele a su marco?

Una de las conclusiones que puede sacarse de los cálculos aritméticos anteriores es que una proyección expresada en relaciones aritméticas sea, probablemente, errónea en principio; frente a las limitaciones naturales y humanas, quizá el ritmo de avance quede determinado en números absolutos más que en relaciones matemáticas. Por ejemplo, si los efectos de la contaminación son proporcionales al combustible quemado, unos incrementos absolutos y sucesivos de consumo de combustible tienen los mismos malos efectos sobre el volumen fijo de la atmósfera. No deberíamos pensar acerca del crecimiento porcentual de la clase media sino acerca de su incremento en números absolutos.

El cálculo realizado de esta manera parte con el crecimiento anual de la población mundial de 75 millones, en la actualidad, crecimiento que se irá intensificando gradualmente hasta 100 millones a finales de siglo; y compara ese incremento con el número de personas que van ascendiendo cada año a la clase media. Si esta última creció en línea recta, desde los 200 millones en 1950 hasta los 500 millones de 1970, entonces el incremento medio anual fue de 15 millones. Mi modelo esquematizado, en el cual la sociedad industrial se va ampliando con la aparición de campesinos en trabajos urbanos a medida que aumenta el capital (mientras los braceros y demás campesinos continúan manteniendo sus antiguos ingresos rurales), vuelve en último término a Adam Smith. Esta sencilla aplicación del modelo de Smith pone de manifiesto que, actualmente, cada año, se incorporan cinco millones de personas a la clase media y 60 millones de personas a la clase pobre. Aun cuando el incremento de la clase media pudiese elevarse a 20 millones por año, los pobres continuarían aumentando hasta alcanzar una tasa de 80 millones por año a finales de siglo. Esta es una extrapolación bastante razonable del proceso de desarrollo registrado en la postguerra. Otros cálculos demográficos señalan cifras menores que las de la ONU, pero su aceptación llevaría al mismo resultado: la gran mayoría de la nueva generación será pobre. Tal es el revés de un rápido crecimiento demográfico.

El aumento natural de la población opulenta creará dificultades en los años venideros, aun cuando la natalidad sea baja. Supóngase que la ventana es lo bastante amplia como para que por ella pasen 20 millones cada año. ¿Quiénes serán? Tal como está hecho el mundo, los hijos de quienes tienen hoy un buen pasar en América, Europa y Japón tendrán la prioridad. La Unión Soviética no ha hallado, ni tampoco los Estados Unidos, la manera de evitar que los miembros de su élite sitúen a sus hijos en la élite. Tomando como base una clase media de 600 millones en 1975, un incremento neto natural de 0,5 por ciento significa tres millones de niños por año como incremento neto. Aparte los niños que van ocupando la plaza de sus padres o abuelos, de los 20 millones de admisiones netas por año, 3 millones serían además hijos de quienes ya han ingresado en la clase media y 17 millones serían nuevos admitidos. Y estos 17 millones de nuevos ingresados estarían divididos entre los pobres de los países desarrollados y los de los países menos desarrollados, teniendo mejores posibilidades los primeros. La gente pobre de los países pobres siente que las probabilidades en su contra y en contra de sus hijos son muy grandes.

Todo lo cual puede contemplarse como una crítica, no del desarrollo, sino de cierto modelo de desarrollo. La distinción entre pobres y clase media representa la dirección seguida por brasileños y soviéticos, pero no la seguida por los chinos. Ya sea a causa de la singular cultura china o de la personalidad de Mao Tse Tung, tanto la especialización que capacita a la gente para trabajos de clase media como las duraderas estructuras de la industria y la administración en las que se sitúan dichos trabajos, han sido insistentemente denegadas en China. Se afirma que cualquiera puede hacer cualquier cosa, que la gente debiera turnarse para los trabajos del campo, los transportes y la enseñanza; la gente necesita sólo determinadas cantidades para alimentarse, vestirse y alojarse, y el consumir más allá de ese austero mínimo es vicio y no virtud. No está claro si este punto de vista puede difundirse entre otras culturas y sin un régimen del mismo tipo. Actualmente hay escasos indicios de que se propague, siquiera hacia la India, por no hablar de Japón, Europa o América.

Thomas Malthus nos dio una teoría agraria del valor, Karl Marx una teoría laboral y los economistas desarrollistas, desde la Segunda Guerra Mundial al presente, una teoría capitalista. Obviamente se precisan tanto tierra como mano de obra y capital (y el asignar prioridad a cualquiera de ellos puede constituir una elección tan ideológica como práctica); pero a todos ellos se sobrepone un factor dinámico, a saber, el nuevo conocimiento científico y técnico. En muchas circunstancias necesitamos saber más a fin de descubrir siquiera los problemas con que nos enfrentamos; sólo recientemente hemos descubierto que los insecticidas pueden ser venenos peligrosos para organismos que no sean insectos, y el actual aumento mundial del cáncer de la piel quizá guarde relación con la disminución de la capa de ozono de la atmósfera superior. Los conocimientos son necesarios incluso para ver en dónde está situada la ventana que restringe el paso hacia la clase media, y sólo el conocimiento puede abrirla más ampliamente.

Se han sugerido otras maneras de ampliar su marco. Una consiste en elevar el precio de las materias primas de cuya exportación dependen los ingresos en divisas de algunos países menos desarrollados. Las alzas de precios como las de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) puede tener, sin embargo, un escaso efecto global sobre el número de personas de clase media en el mundo (aunque sí tienen ciertos efectos respecto de si la nueva clase media hablará español, árabe o inglés). No se ha esclarecido quién soporta en último término la carga de esas subidas. Parte de la carga la soportan países pobres carentes de materias primas; cuando se hayan analizado las repercusiones, quizá la India descubra que ha aportado una proporción de sus ingresos a la opulencia de Arabia Saudita mayor que los mismos Estados Unidos. Ciertamente, una parte del fertilizante estadounidense que antes de 1973 hubiese ido a parar a la India se destina ahora a Oriente Medio; las inversiones alemanas en plantas de productos químicos están desviando su rumbo de manera parecida. La compensación de las alzas del precio del petróleo

mediante venta de armas francesas a Irán tiene muchísimo que ver con la potencia nacional y muy poco con la definición total de pobreza o tan siquiera con su distribución nacional. El punto principal es que sólo una pequeña proporción de la población mundial se encuentra en zonas ricas en recursos.

Una segunda manera de ayudar a más gente a escapar de la pobreza podría consistir en que quienes ya han ingresado en la clase media moderen su consumo. En principio, si un comedor de carne limita su consumo, cinco comedores de cereales pueden aumentar el suyo. Si los coches estadounidenses fuesen más pequeños, habría más metales y combustibles a disposición para coches en Zaire y Bangladesh, como también –y más inmediatamente– para fábricas de fertilizantes en esos países. Si los habitantes de las ciudades estadounidenses se pusieran a vivir como los suecos, igualmente opulentos, podría reducirse a la mitad el consumo de energía en Estados Unidos. El problema es que los bienes, como también los trabajos que exigen materias primas, se traman con otras actividades sociales formando un encadenamiento o urdimbre que es difícil cambiar; las configuraciones sociales son una realidad tan sólida como las materias primas. Después de dos años de debates sobre la moderación, los Estados Unidos no han reducido su consumo de combustible fósil. Al enfrentarse con una escasez mundial de materias primas, toda persona de buena voluntad desea una disminución de las prácticas de despilfarro, pero los límites intrínsecos para las transferencias que he mencionado al comienzo y la enorme inercia almacenada en los patrones de producción y gastos hacen que un menor consumo sea improbable; menor consumo que sería una forma de ayuda a los países pobres por parte de los Estados Unidos.

La ayuda exterior y las inversiones según usos convencionales constituyen una tercera posibilidad, pero han resultado decepcionantes. Han ayudado al desarrollo de algunos países (de los cuales, Canadá es un ejemplo notable); por diversas razones, el volumen es inadecuado para la magnitud del problema en la mayor parte de la población mundial. En los mismos casos en que las inversiones están sólidamente basadas en la economía, ciertos intelectuales alegan que crean dependencia, y los políticos de países pobres responden a menudo con la expropiación. Paradójicamente, la sola mención de expropiaciones resulta costosa para el país pobre porque hace que los inversionistas exijan un mayor rédito.

Puede decirse que resultan aconsejables unos mejores precios para las materias primas, una disminución del consumo de los países ricos y la ayuda exterior e inversiones extranjeras convencionales; pero la experiencia de las décadas de 1950 y 1960 muestran que todos esos factores no constituirán una diferencia decisiva respecto del tamaño de la ventana de la cual se pretende huir de la pobreza.

Lo que creará una diferencia decisiva es el dominio de los conocimientos siguientes: cómo producir comodidad con menos medios, cómo reemplazar materiales escasos por otros comunes, cómo obtener los resultados deseados con menos energía y cómo recabar esa energía de fuentes renovables y no de combustibles fósiles.

En la pasada década se consiguieron algunos resultados. Con el advenimiento de los circuitos integrados, una calculadora que costaba 1000 dólares y pesaba 20 kilos está reemplazada ahora por otra que cuesta 10 dólares y pesa unos decígramos. Los satélites artificiales han abaratado el coste de las comunicaciones; extienden la televisión hasta las aldeas de la India y quizá hagan que, a la larga, las conferencias telefónicas entre antípodas sean tan baratas como las llamadas locales. Los polímeros sintéticos han reemplazado al algodón y la lana, dejando así tierras libres para otros cultivos. La lista de lo que aún se necesita es demasiado larga para detallarla: colectores solares eficientes, acumuladores compactos para hacer marchar automóviles mediante energía generada centralmente, plásticos más fuertes y baratos (para carrocerías de coche), y así sucesivamente.

Si la dimensión temporal de la puesta en marcha de estas invenciones es crucial, entonces todo lo que se haga para apresurar el hallazgo redundará en provecho del movimiento del mundo hacia más arriba de la línea de pobreza. Hay muchas etapas, desde la investigación científica pura hasta la traducción de la ciencia en tecnología, hasta la técnica concreta que saca un modelo de producción en serie a partir de un prototipo que funcione y, finalmente, hasta la contratación de piezas y la línea de montaje; cada etapa pide su tiempo. Se dice que los Estados Unidos, que antaño eran los primeros en cuanto a la velocidad a la que podían convertir el conocimiento en producción de bienes, están perdiendo ese privilegio; una deceleración en ese sentido tendría malas consecuencias no sólo para la posición competitiva de los Estados Unidos entre las naciones industriales sino también para la huida del mundo respecto de la pobreza. La necesidad no se limita al campo de la ingeniería; se precisan soluciones urgentes para muchos problemas de biología y medicina, climatología y geofísica. El conocimiento técnico y social sobre el control de la natalidad tiene especial importancia; sea cual fuere el tamaño de la ventana a través de la cual los pobres huyen hacia la clase media, la disminución de los nacimientos acercará por lo menos el día en que la pobreza mundial deje de aumentar en números absolutos.

Parte de las investigaciones estadounidenses se han centrado específicamente en estrategias que importan un mayor empleo de mano de obra, adecuadas para países pobres, y debiera alentarse este tipo de investigaciones. Por ejemplo, incluso después de la Revolución Verde, los países pobres continúan teniendo problemas agrícolas especiales. Además de dichas investigaciones específicas, Estados Unidos ayuda a todos los países cuando elabora conocimientos que hacen más eficientes su propia industria.

Una especial preocupación de los países menos desarrollados es la dependencia; y se tilda de neocolonialismo el propio endeudamiento comercial. La evolución técnica de los países pobres según unas pautas adecuadas a sus propias necesidades se vería ayudada por la ampliación de conocimientos en Estados Unidos, en cuanto que ello supondría una gama mayor de técnicas entre las cuales dichos países pudiesen elegir. Para que tal aportación estadounidense no crease endeudamiento comercial, sería aconsejable poner los nuevos conocimientos y las invenciones en poder del público en general como un dominio común de la humanidad, en vez de encerrarlos en patentes de las que pudiesen obtenerse regalías.

Las limitaciones de la producción y las limitaciones ambientales frenan el crecimiento de la clase media mundial. No es a través de sistemas de repartición del producto existente como Estados Unidos puede ayudar a abrir la ventana, sino mediante la aportación de conocimientos que aumenten el producto. La resolución de los problemas ambientales y de producción comienza por la propia casa, pero toda aportación que lo sea tendrá un valor a escala mundial. Pueden idearse incentivos para encaminar la tecnología en direcciones que salven, y no que dañen, el medio ambiente. Nadie puede predecir cuánto tiempo se ocupará en resolver cualquier problema técnico particular, ni mucho menos el conjunto de problemas, pero ese tiempo –sea cual fuere– se abreviará mediante una movilización más caudalosa e inmediata del talento científico y técnico.

La guerra nuclear limitada

Los Estados Unidos se están preparando para una guerra limitada a los ataques contra bases militares, con pocas bajas civiles. Pero, ¿es razonable pensar en un número reducido de bajas y cabe ponerle límites a la guerra?

Sidney D. Drell y Frank von Hippel

Durante más de un decenio, las opciones estratégicas de los Estados Unidos han obedecido al reconocimiento y a la aceptación de unos cuantos hechos muy simples: los norteamericanos se reconocen rehenes nucleares de los rusos y éstos de aquéllos. En caso de guerra, ni los Estados Unidos ni la Unión Soviética serían capaces de evitar su virtual aniquilación; incluso si uno de los dos bandos iniciase la guerra con un ataque en masa de carácter preventivo, el otro seguiría conservando su capacidad de "destrucción asegurada", es decir, la posibilidad de devastar al país atacante. De una u otra forma, este reconocimiento ha constituido el fundamento de la disuasión mutua que ha prevalecido durante la mayor parte del último cuarto de siglo.

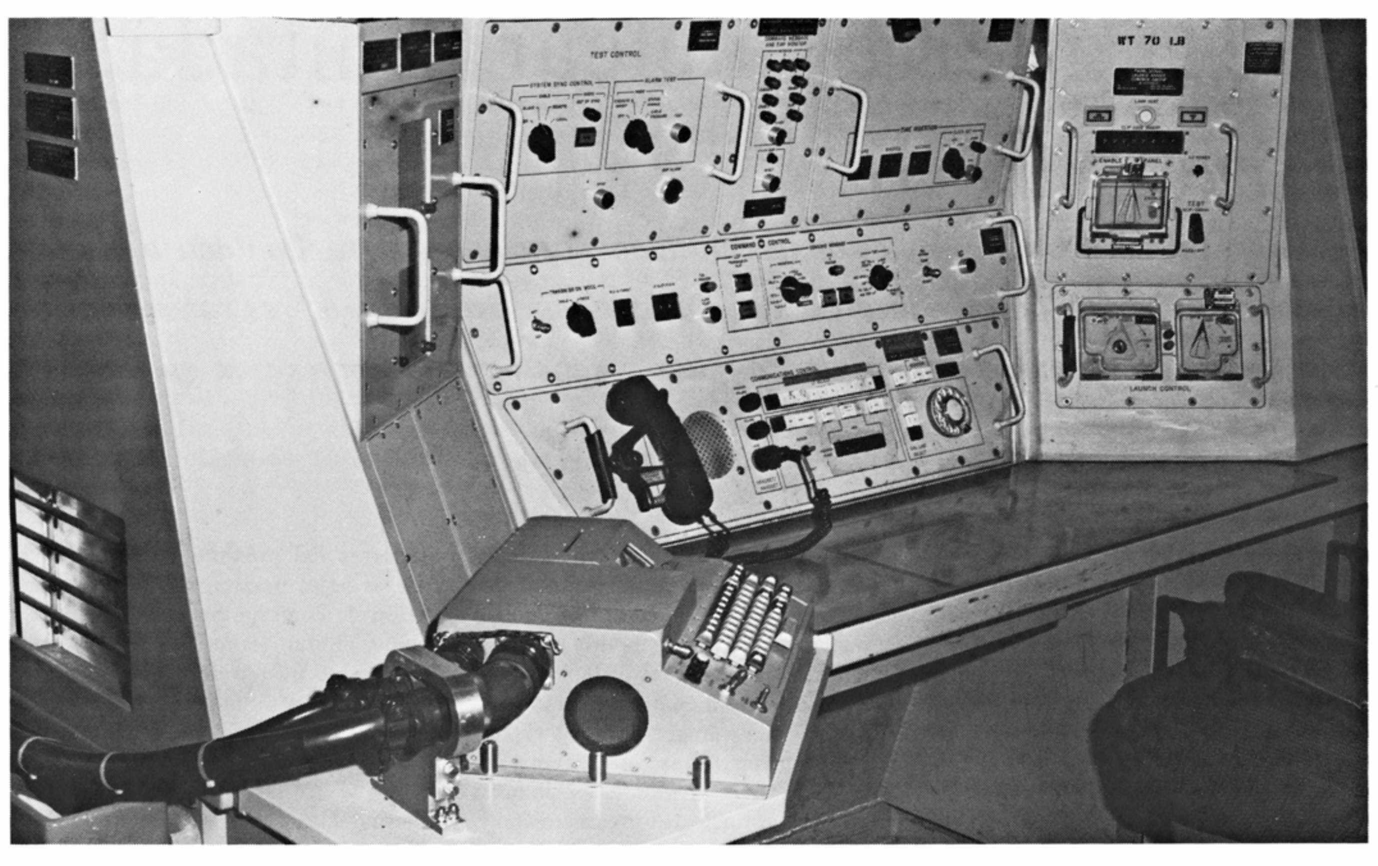
Sin embargo, también se ha aceptado la posibilidad de que las armas nucleares se usaran restrictivamente por parte de ambos bandos, sin llegar a la devastación total.

En 1970, el presidente Nixon subrayó la importancia de tener otras opciones, que no fueran el llamado "desquite masivo", para responder a un ataque reducido (y posiblemente fortuito). Esta formulación de una respuesta flexible no representaba ninguna novedad. Durante muchos años, los dirigentes norteamericanos dispusieron de la opción de lanzar un ataque nuclear limitado en lugar de un ataque total. Con todo, el ex secretario de Defensa John R. Schlesinger, en su comunicación al Congreso el 4 de marzo de 1974, amplió el campo de vigencia de la respuesta flexible, ya que, de acuerdo con su formulación, los Estados Unidos deberían incluir en su repertorio de respuestas flexibles la posibilidad de replicar a un ataque nuclear limitado con acciones seleccionadas, en especial, acciones de "contragolpe" dirigidas contra las instalaciones militares enemigas. Schlesinger sostuvo que estas acciones serían cualitativamente diferentes de los ataques intencionados contra los centros de población, y que disminuiría la probabilidad de que una guerra nuclear limitada se convirtiera en ataque mutuo masivo, con gran número de bajas civiles; añadió asimismo que un sistema flexible haría más creíble la posibilidad de un ataque nuclear norteamericano y, por consiguiente, incrementaría la ventaja que representan las fuerzas nucleares de los Estados Unidos en las confrontaciones internacionales.

Desde 1974, Schlesinger y otras voces autorizadas en materia de defensa han ido poniendo de relieve lo que consideran como los dos nuevos requisitos necesarios en una estrategia de respuesta flexible. Uno de ellos es la puesta a punto de misiles balísticos intercontinentales (ICBM), capaces de destruir objetivos militares rusos reforzados o "duros", como, por ejemplo, los misiles emplazados en silos subterráneos a prueba de explosiones. El segundo requisito es una importante ampliación del programa de defensa civil, que en gran parte ha permanecido archivado desde comienzos de la década de los sesenta. Este programa tendría la finalidad de reforzar la credibilidad de la postura adoptada por los Estados Unidos en favor de una guerra nuclear limitada, puesto que protegería a la población civil de los efectos de posibles ataques nucleares limitados por parte de la Unión Soviética. Estos nuevos enfoques ponen el acento en la capacidad de intervenir en una guerra nuclear limitada y "ganarla".

El cambio de estrategia propuesto y las medidas de desarrollo de armamento y de ampliación de la defensa civil en que se pretende apoyarlo han sido criticados por dos razones principales. En primer lugar, los cálculos minuciosos basados en las características de las armas nucleares del próximo decenio indican que las bajas ocasionadas por cualquier acción de contragolpe que tenga significación militar serían tan elevadas que el concepto mismo de guerra nuclear limitada perdería todo sentido. En segundo lugar, la estrategia de contragolpe basada en la capacidad de destruir los ICBM enemigos acrecentaría el riesgo de una guerra nuclear.

En su declaración ante un subcomité del comité del Senado para Asuntos Exteriores, en marzo de 1974, Schlesinger argumentó en apoyo de semejante capacidad de contragolpes que una acción de contragolpe contra los Estados Unidos podría producir "centenares de miles" de bajas civiles, "en comparación con las decenas y los centenares de millones" que podrían resultar de un ataque nuclear mutuo total. Varios senadores mostraron su escepticismo ante el hecho de que una acción militarmente válida pudiera causar tan pocas bajas. En particular, Clifford P. Case, senador por Nueva Jersey, solicitó que se explicaran con más detenimiento los puntos de partida utilizados para el cálculo de las bajas. En septiembre, Schlesinger volvió al Senado llevando consigo los cálculos realizados con los ordenadores del Departamento de Defensa sobre las consecuencias de una guerra nuclear limitada. Las cifras indicaban que, si existía y se aprovechaba una amplia protección en materia de defensa civil, un ataque ruso contra la totalidad de los 1054 ICBM de los tipos Minuteman y Titan, utilizando una cabeza nuclear de un megatón contra cada silo, causaría unas 800.000 muertes civiles. De todo ello, Schlesinger sacaba la conclusión de que "no puede dudarse de la posibilidad de los ataques nucleares limitados basándose en que se registrarían cifras enormes de muertos y de heridos civiles".



LA CONSOLA DEL MINUTEMAN III, que pertenece al jefe de la dotación de combate, gobierna el lanzamiento de una escuadrilla de 10 misiles. El teclado *(en primer plano)* corresponde al sistema de Command Data Buffer, que reasigna los objetivos en 36 minutos.

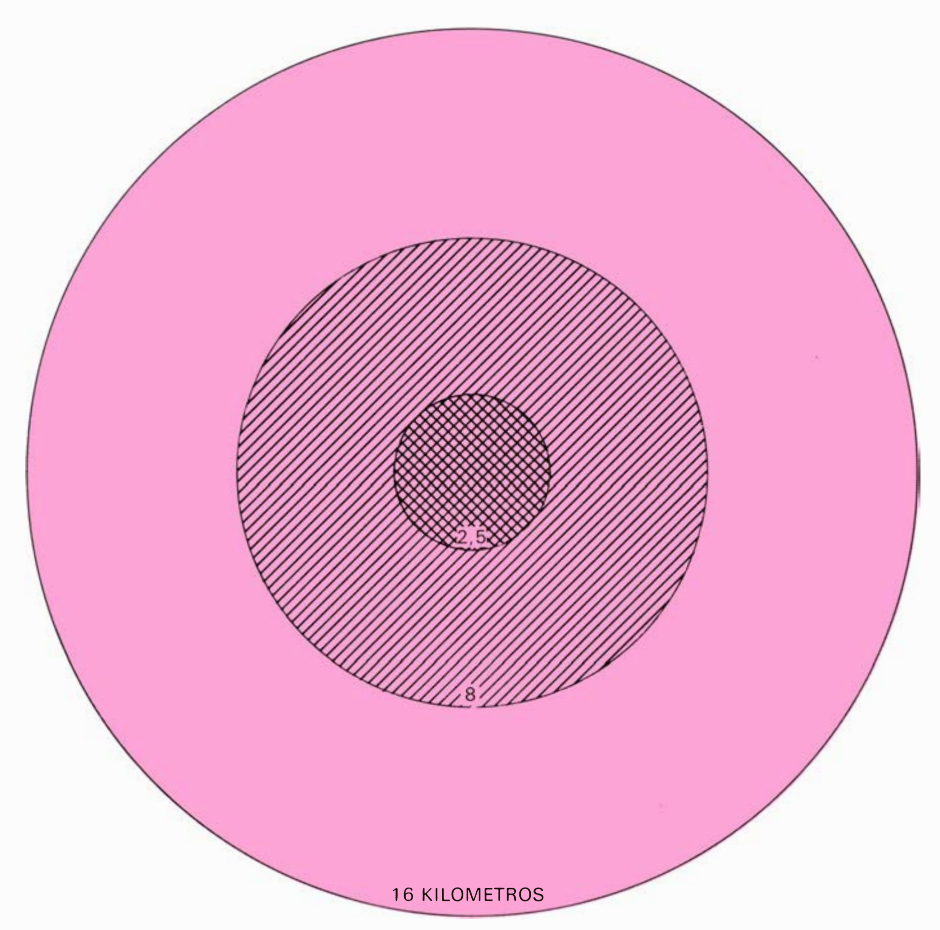
LA CONSOLA DE UN MINUTEMAN II que se muestra aquí es la del segundo jefe. Las consolas se hallan en centros de control de lanzamiento subterráneos. Estados Unidos dispone de 450 Minuteman II y de 550 Minuteman III con vehículos de reentrada con objetivos múltiples.

Algunos senadores no acababan de convencerse, y el Office of Technology Assessment (OTA) del Congreso recibió el encargo de revisar los cálculos del Departamento de Defensa. Un grupo de expertos, del que formaba parte uno de los autores (Drell), manifestó en el informe correspondiente, presentado en febrero de 1975, que "la cifra de bajas calculada para los ataques en cuestión era demasiado reducida, ya que no se habían tomado en cuenta los efectos a medio y largo plazo" de las explosiones nucleares. Centrando la atención en que la acción rusa supuesta por el Departamento de Defensa "no se proponía evidentemente destruir al máximo los ICBM norteamericanos", el grupo de expertos afirmaba que un esfuerzo real por parte rusa para causar el máximo daño posible a las fuerzas estratégicas de los Estados Unidos actualmente en servicio, o en fase de puesta a punto, "produciría daños enormes a la sociedad norteamericana". El grupo de estudio planteaba varias cuestiones concretas sobre algunos de los supuestos de que partían los cálculos del Departamento de Defensa y solicitaba asimismo que se estimase el grado probable de daños que los supuestos ataques causarían en los objetivos militares norteamericanos. Este punto resultaba decisivo, puesto que sería ilusorio y engañoso calcular una cifra de bajas reducida para un imaginario ataque de contragolpe insignificante (y, por lo tanto, improbable).

Para responder a las críticas del grupo de expertos, los analistas del Departamento de Defensa comprobaron la exactitud de sus cálculos en relación con los supuestos discutidos por el grupo y evaluaron la efectividad de diversas acciones rusas posibles. A continuación examinaremos estas cuestiones y algunos de sus factores técnicos subyacentes; nos apoyaremos, en parte, en los resultados obtenidos por el Departamento de Defensa, publicados en julio de 1975, así como en un estudio independiente, realizado por Henry C. Kelly, del Office of Technology Assessment en colaboración con Richard L. Garwin y uno de nosotros (von Hippe), y presentado al Comité de Asuntos Exteriores en septiembre del mismo año. Las conclusiones son las siguientes: las acciones que causasen relativamente pocas bajas, serían militarmente insignificantes; las acciones que produjesen daños apreciables a las fuerzas estratégicas de los Estados Unidos ocasionarían bajas civiles muy importantes; incluso el más amplio de los ataques de contragolpe analizados seguiría dejando una capacidad de respuesta tan enorme en manos de los norteamericanos, que cualquier estrategia de contragolpe resultaría ineficaz desde el punto de vista ruso.

Empezaremos examinando las técnicas seguidas en el cálculo de las bajas civiles producidas por un ataque nuclear. El nivel de bajas depende estrechamente de muchos factores, como, por ejemplo, el tipo de ataque, las condiciones atmosféricas y la protección de la defensa civil.

De cualquier forma, las características físicas básicas de los efectos producidos

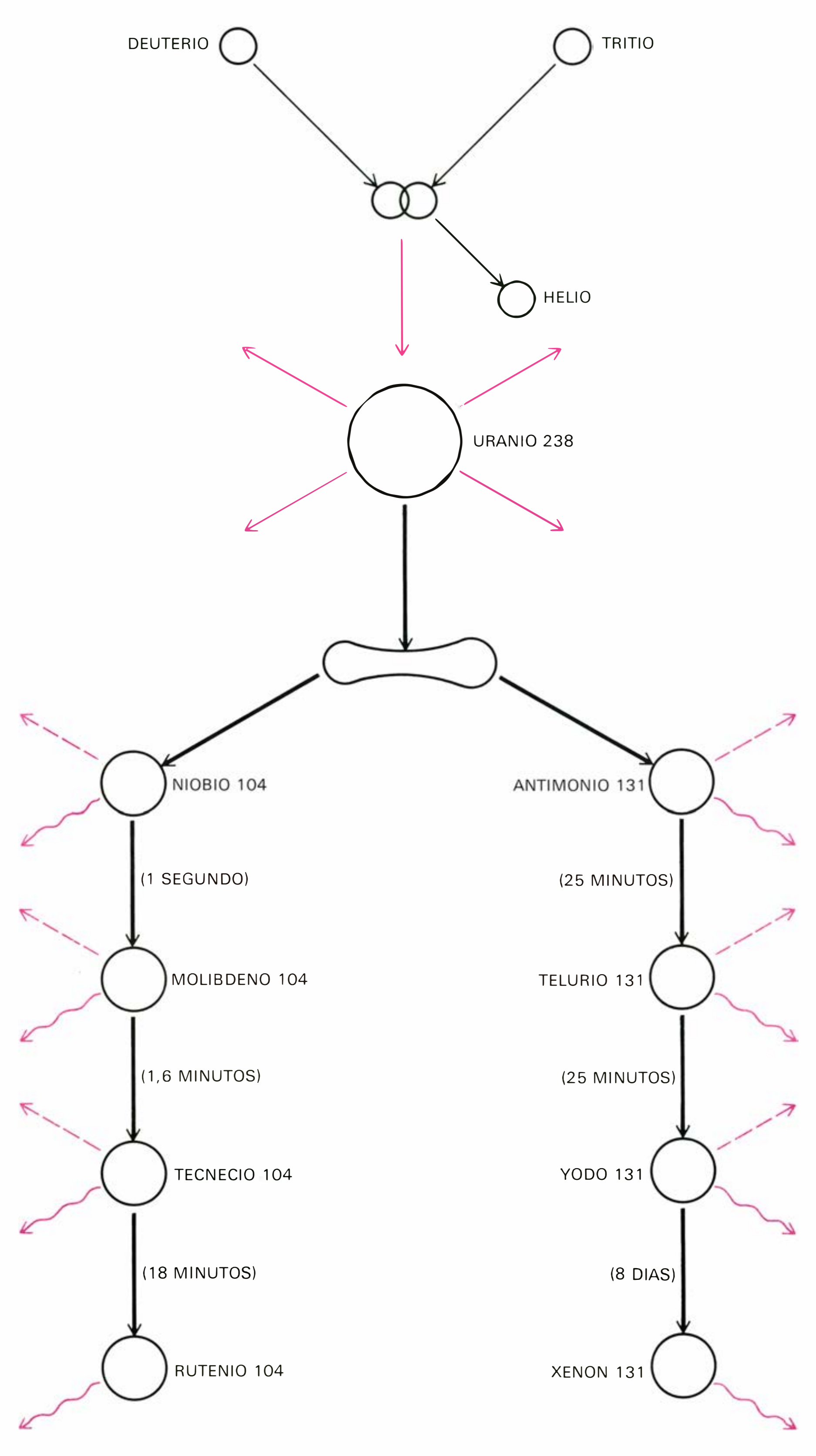


CAUSA	EFECTO
RADIACION TERMICA	QUEMADURAS, INCENDIOS, POSIBLE TEMPESTAD DE FUEGO
CHOQUE	BAJAS DEBIDAS AL DERRUMBAMIENTO DE EDIFICIOS Y A FRAGMENTOS DE CRISTALES PROYECTADOS
RADIACION NUCLEAR	MUERTES POR RADIACION

LOS EFECTOS INMEDIATOS de una explosión nuclear se deben a la radiación nuclear inicial, la onda de choque y las radiaciones térmicas. Se dan los radios aproximados en que se apreciarían los efectos, para una cabeza nuclear de un megatón al explotar en superficie.

DOSIS (EN REMS)		EFECTO
RECIBIDA DURANTE UNA SEMANA	RECIBIDA DURANTE UN MES	
150	200	UMBRAL DE MORBILIDAD DEBIDA A LA RADIACION
250	350	MORTALIDAD POSIBLE DEL 5 POR CIENTO
450	600	MORTALIDAD POSIBLE DEL 50 POR CIENTO

LOS EFECTOS BIOLOGICOS de la radiación varían con la tasa a que se recibe una dosis. La unidad de dosis, el rem, tiene en cuenta la eficacia relativa de cada tipo de radiación.



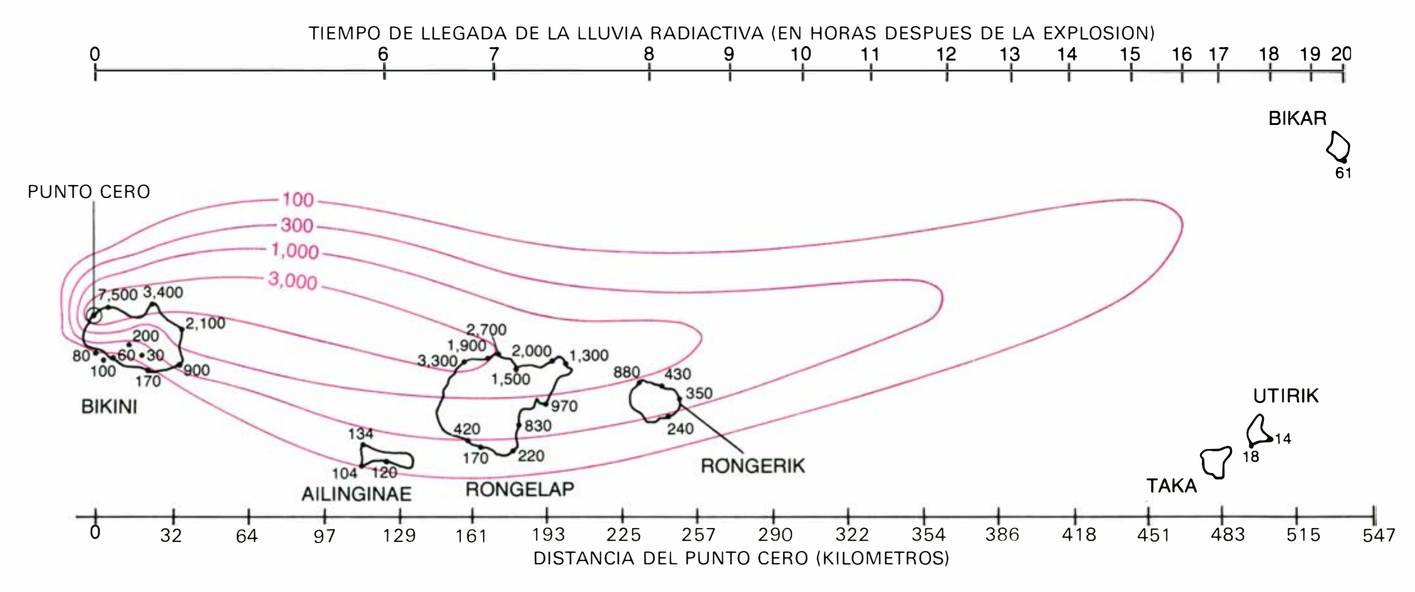
LOS PRODUCTOS DE LA FISION, de los cuales procede la radiación de la lluvia radiactiva, ocurren en la cadena de acontecimientos que tienen lugar después de la explosión, en este caso una explosión de fisión-fusión-fisión típica. Bajo los efectos del calor producido por una explosión de fisión inicial, el deuterio y el tritio, isótopos del hidrógeno, se fusionan para formar helio, liberando un neutrón rápido *(fecha de color)*. El neutrón penetra en el núcleo de un átomo de uranio 238, haciéndolo inestable; el átomo se fisiona, liberando cuatro neutrones y dos productos, de fisión. Estos emiten rayos beta o electrones *(flecha de trazos)* y rayos gamma *(flechas onduladas)*, desintegrándose y dando otros productos. Cada cadena de desintegración termina al final en un isótopo estable. Para cada transición existe una vida media característica, que tiende a ser más prolongada cuanto más cercana se halla la etapa de estabilidad. Otras cadenas de desintegración, que no se muestran en esta figura, producen dos importantes radioisótopos de vida larga, como son el estroncio 90 y el cesio 137.

por las cabezas nucleares están perfectamente estudiadas y son ampliamente conocidas; se hallan expuestas con la mayor amplitud posible en *The Effects of Nuclear Weapons,* publicación del Departamento de Defensa y de la Comisión de Energía Atómica, preparada por Samuel Glasstone, que vio la luz por primera vez en 1957 y, posteriormente, en edición revisada, en 1962.

En el caso de una explosión nuclear a baja altura que libere una energía equivalente a un millón de toneladas (un megatón) de TNT, los efectos inmediatos de presión, temperatura y radiactividad afectarían a un área de unos 15 kilómetros de radio alrededor del punto cero. En los objetivos militares situados cerca de centros de población, como pueden ser los astilleros, bases de submarinos lanzamisiles y ciertos puestos de mando, el Departamento de Defensa calculó que las muertes producidas exclusivamente por la onda de choque oscilarían entre 50.000 y 100.000, en el caso de una cabeza nuclear que estallara a una altitud lo bastante elevada para que la lluvia radiactiva local no representara un peligro. Si se tratase de objetivos militares situados en zonas de poca densidad de población, las bajas debidas a esos efectos inmediatos serían más reducidas.

En semejantes objetivos, la mayoría de las bajas civiles se producirían a causa de la lluvia radiactiva; y hay que tener en cuenta que la lluvia radiactiva de un ataque ruso contra una base de misiles Minuteman podría ser mortífera a muchos cientos de kilómetros de distancia, en la dirección del viento dominante. Tomando en consideración las armas actualmente en servicio o que pueden estarlo en los próximos diez años, un ataque de esta clase podría realizarse mediante un explosivo nuclear de un megatón o dos, preparados para su detonación cerca de la superficie en cada uno de los 150 o 200 silos reforzados de ICBM de la base.

La lluvia radiactiva se debe a los miles de toneladas de tierra, rocas y otros materiales fundidos o evaporados por el calor de cada explosión y mezclados con los subproductos radiactivos de la misma. Estas partículas serían arrastradas hasta una altitud de unos 13 kilómetros por la ascensión de la bola de fuego. Esta se enfriaría en la estratosfera y las partículas de mayor tamaño caerían al suelo, en el término de un día aproximadamente, sobre un área que se extendería a varios cientos de kilómetros en la dirección del viento dominante, en forma de lluvia radiactiva "local". Las partícu-



LOS PELIGROS que representa la lluvia radiactiva local de una explosión termonuclear, al ser arrastrada por el viento, quedaron patentes en la prueba de una bomba de fisión-fusión-fisión, de 15 megatones, realizada en el atolón de Bikini el 1 de marzo de 1954. Las medidas *(cifras en negro)* **señalan la dosis, en rems, acumulada 96 horas después. Las líneas de isointensidad dibujan la zona afectada.**

las más pequeñas serían arrastradas a gran distancia y acabarían por depositarse en la superficie terrestre en forma de lluvia radiactiva global.

Los peligros de la lluvia radiactiva local quedaron demostrados de manera dramática por los hechos consiguientes a la primera prueba de una bomba de fisión-fusión-fisión (con una potencia de 15 megatones) realizada por los Estados Unidos en el atolón de Bikini, el primero de marzo de 1954 *(véase la ilustración superior de esta página).* Unos pescadores que se encontraban a 130 kilómetros en la dirección del viento recibieron dosis tan elevadas de radiación que uno de ellos acabó por fallecer. Los habitantes del extremo meridional del atolón de Rongelap, a 160 kilómetros en la dirección del viento, sufrieron los graves efectos de la radiación a corto y largo plazo. Si hubiesen residido en la parte norte del atolón, los niveles de radiación más elevados que se registraron allí les hubieran matado, casi con toda seguridad.

En el caso de que, contrariamente a lo que hicieron los habitantes de Rongelap, la gente de la zona afectada por la lluvia radiactiva local no ingiriera comida o agua contaminadas, el principal peligro residiría en la radiación externa de las partículas radiactivas. (La mayor parte de las partículas de la lluvia radiactiva local serían demasiado grandes para pasar a los pulmones por inhalación.) Si la gente buscase refugio y no entrase en contacto directo con la lluvia radiactiva, evitando de este modo las quemaduras causadas por las partículas beta (los electrones de corto alcance emitidos por los núcleos radiactivos), el principal peligro estaría representado por la radiación gamma, de mucho mayor poder de penetración.

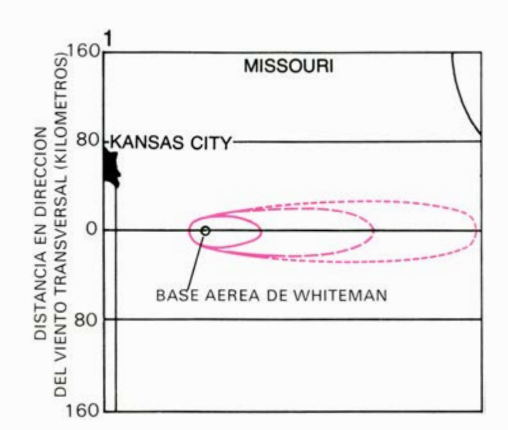
Para determinar la distribución y las consecuencias de la lluvia radiactiva local es necesario conocer el rendimiento de la fisión y la altura de la explosión de cada cabeza nuclear, los efectos biológicos de una dosis dada de radiación absorbida, la influencia de las condiciones atmosféricas sobre la configuración del área afectada por la lluvia radiactiva, el grado de protección de la población y la distribución geográfica, así como la potencia total, en megatones, del ataque. Las previsiones sobre la cifra de muertos y heridos variarán según los supuestos que se planteen acerca de cada uno de los factores citados, que iremos considerando.

La radiactividad de la lluvia provendría, en su mayor parte, de la fisión. Un arma "termonuclear" es, por lo general, un ingenio de fisión-fusión-fisión, en el cual un "pequeño" explosivo de fisión (uno de estos dos isótopos, el uranio 235 o el plutonio 239, que dan lugar a una reacción en cadena) sirve a su vez como detonante para una explosión por fusión de deuterio y tritio, isótopos del hidrógeno, por ejemplo. Los neutrones rápidos emitidos por la reacción de fusión producen a continuación la fisión de los núcleos de una gran cantidad de uranio 238 (isótopo que no da lugar a una reacción en cadena), liberando más energía de fisión *(véase la ilustración de la página anterior).* En los cálculos del Departamento de Defensa se suponía que el 50 por ciento de la energía liberada se debía a la fisión, lo cual constituye una proporción representativa.

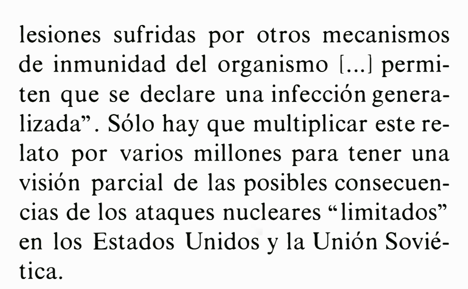
Las consecuencias biológicas de la radiación gamma dependen de la dosis total recibida y del período de tiempo durante el que se aplica.

Así, los analistas del Departamento de Defensa tomaron como dosis mortal media de radiación la de 450 rems, para dosis recibidas en el transcurso de unos pocos días. (El rem, siglas de "Röntgen, equivalencia, mamífero", es una unidad de medida de los efectos biológicos de la radiación). Para dosis recibidas durante un tiempo más prolongado, la dosis mortal se fijó en un nivel algo más alto, puesto que, con el tiempo, todo sistema biológico puede compensar en una medida considerable los daños debidos a la radiación. La dosis efectiva, soportada por la población afectada cuando la tasa de compensación se equilibra estrictamente con la tasa de los daños provocados por el campo ambiental de radiación en disminución, sería la "dosis biológica máxima" y determinaría el carácter mortal de la exposición a la radiación.

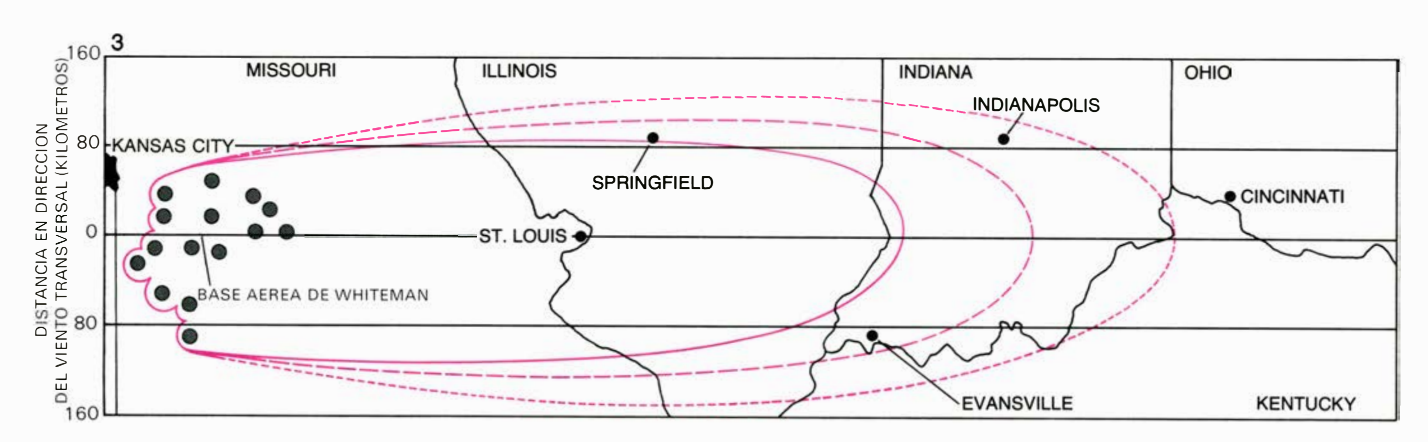
La muerte a consecuencia de las enfermedades producidas por la radiación sería lenta y dolorosa. Tal como se afirma en el libro de Glasstone, "los síntomás iniciales son [...] náuseas, vómitos, diarrea, pérdida del apetito y malestar." A partir de la segunda o tercera semana después de que el individuo haya estado expuesto a la radiactividad "se registra una tendencia a sangrar en varios órga-

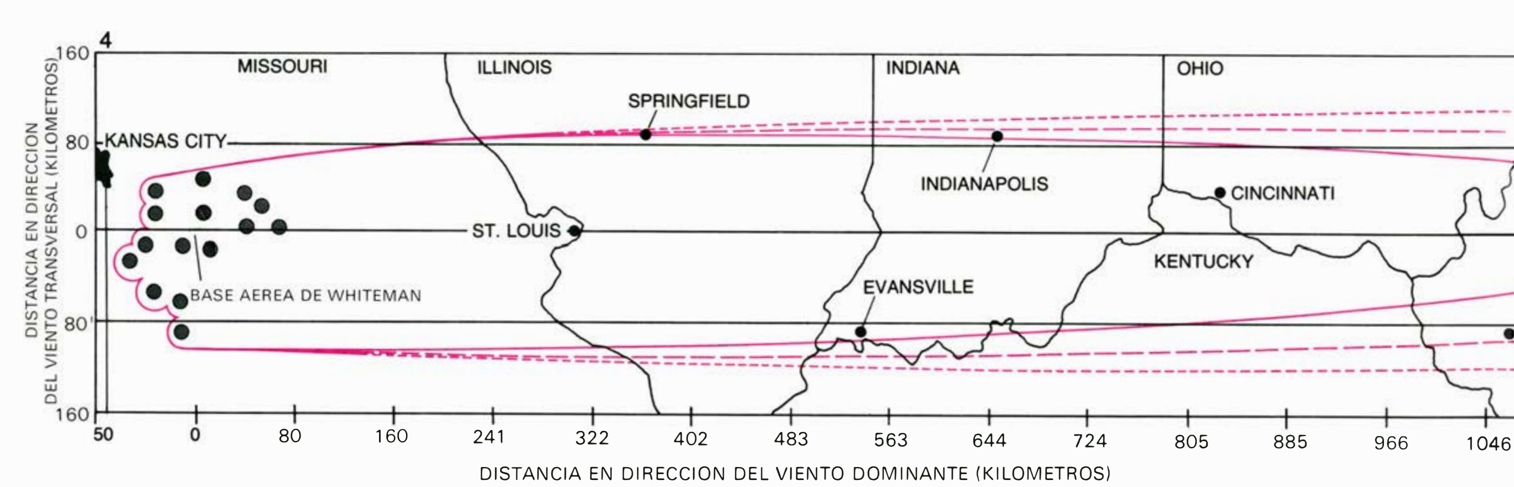


nos y se observan pequeñas hemorragias debajo de la piel". Son comunes las pérdidas de sangre espontáneas por la boca y el conducto intestinal. "La caída del cabello [...] se inicia también al cabo de unas dos semanas [...]. La ulceración alrededor de los labios puede [...] extenderse desde la boca a todo el conducto gastrointestinal". Finalmente, "la disminución de los leucocitos de la sangre y las


lesiones sufridas por otros mecanismos de inmunidad del organismo [...] permiten que se declare una infección generalizada". Sólo hay que multiplicar este relato por varios millones para tener una visión parcial de las posibles consecuencias de los ataques nucleares "limitados" en los Estados Unidos y la Unión Soviética.

Si, por ejemplo, los productos recientes de un megatón de fisión se esparcieran uniformemente por un área totalmente plana de unos 1600 kilómetros cuadrados, la tasa de la dosis de rayos gamma a un metro sobre el suelo sería de 250 rems por hora, al cabo de 10 horas. Para los seres humanos, la dosis mortal media con una dosis proporcional tan elevada es de unos 450 rems. La tasa de la dosis de rayos gamma disminuiría dieciséis veces por cada aumento en diez veces del período de tiempo transcurrido, durante los primeros seis meses contados a partir de la explosión, y con





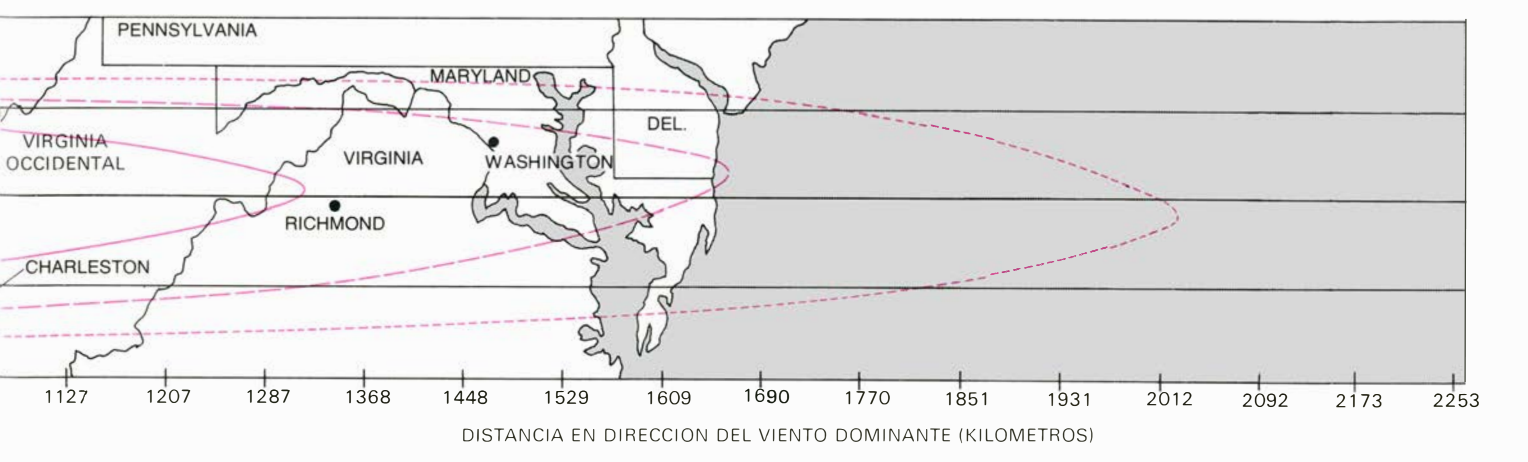
LAS AREAS AFECTADAS por la lluvia radiactiva se han calculado para un ataque mediante cabezas nucleares (con un 50 por ciento de su rendimiento explosivo debido a la fisión) explosionadas en superficie sobre los ICBM de la base aérea de Whiteman, en Missouri. Las líneas de isointensidad corresponden a las dosis biológicas máximas de 1350 rems al aire libre o 450 rems (50 por ciento de muertos) en el interior de una vivienda media *(línea continua)*; de 450 rems al aire libre *(línea de trazos)*; y de 150 rems al aire libre *(línea de puntos)*, que representa el umbral de mortalidad. Las cuatro áreas corresponden a una sola cabeza nuclear *(1)*, a una cabeza nuclear en cada uno de los 10 si-

posterioridad lo haría más rápidamente. En el ejemplo considerado, la intensidad de radiación habría disminuido hasta los 15 rems por hora al cabo de cuatro días y, a un rem por hora aproximadamente, a los 40 días. Sin embargo, para una persona que permaneciera en la zona de radiación, la dosis acumulada continuaría aumentando significativamente durante largo tiempo. Consideremos la lluvia radiactiva local que se inicia al cabo de unas diez horas de la explosión, tiempo normal para que la precipitación llegue al suelo. Un 40 por ciento de la dosis que se acumulara a partir de aquel momento quedaría aún activa al cabo de cuatro días y, un 25 por ciento, al cabo de 40 días.

La altura a la que se realizara la explosión de las cabezas nucleares, que influye mucho sobre la cantidad de lluvia radiactiva depositada en la dirección del viento dominante, dependería del objetivo escogido. En los ataques de contragolpe supuestos por el Departamento de Defensa, la mayor parte de los megatones se dirigirían contra los silos subterráneos de los misiles Minuteman. Según el Departamento, la eficacia destructiva de explosiones realizadas a ras del suelo y en el aire, a "la altura óptima de explosión", sería casi equivalente. (La altura óptima de explosión es aquella que, para un rendimiento dado, produce una presión debida a la explosión que supera un cierto valor en la mayor superficie posible; para un rendimiento de un megatón y una sobrepresión de unos 70 kilos por centímetro cuadrado, dicha altura sería de unos 300 metros.) Así, el atacante tendría que escoger necesariamente entre dos posibilidades incompatibles entre sí. Por una parte, una explosión a ras del suelo no exige tanta precisión como una explosión aérea (lo cual es importante, puesto que los ataques contra objetivos "duros" exigen, ante todo, una puntería afinada al máximo). Por otra parte, los cálculos del Departamento de Defensa demuestran que, en igualdad de condiciones, en el caso de un ataque contra los ICBM norteamericanos la cifra de muertes debidas a la lluvia radiactiva podría ser cuatro veces más elevada en las explosiones en superficie que en las controladas a determinada altura.

La bola de fuego producida por una explosión nuclear de un megatón se eleva rápidamente, junto con los productos de fisión que contiene, hasta que la parte superior de la nube originada por el enfriamiento de dicha bola de fuego penetra en la estratosfera, a unos 10 kilómetros sobre el nivel del mar en latitudes medias. A una altitud de unos 16 kilómetros, la nube se estabiliza y sus productos de fisión se dispersan sobre una superficie de unos 6 o 7 kilómetros de diámetro. Para una explosión de un megatón, el tiempo medio de precipitación de la lluvia radiactiva local suele ser de unas ocho horas. El tiempo de precipitación y la velocidad media de los vientos existentes entre el pico de la nube y el suelo determinan la distancia a que resultan arrastradas las partículas por el viento dominante. Para una velocidad media del viento de 30 kilómetros por hora, muy usual, la distancia media de arrastre sería de unos 260 kilómetros. (El tiempo de precipitación determina también hasta qué punto los isótopos radiactivos de vida corta se desintegran sin producir daños antes de llegar al suelo.) La extensión del área afectada por la lluvia radiactiva depende esencialmente de las diferencias de velocidad y dirección de los vientos a que se hallan sometidas las partículas a distintas alturas de la nube. Supuesto un gradiente vertical de velocidad del viento de un kilómetro por hora y por kilómetro de altura, bastante normal, y una velocidad media de 30 kilómetros por hora, la anchura del área afectada por la lluvia radiactiva, a 160 kilómetros del punto cero, en la dirección del viento, sería de unos 40 kilómetros.

Es evidente que el número de bajas depende mucho de las condiciones atmosféricas que se den por supuestas. En los cálculos del Departamento de Defensa, la cifra total de bajas de un hipotético ataque era tres veces más elevada si soplaban los vientos típicos de marzo que con vientos de junio. Estas variaciones se deben en gran parte a los cambios de dirección y de velocidad de los vientos, cambios que determinan si el área afectada por la lluvia radiactiva engloba o no ciertas zonas densamente pobladas. Sea, por ejemplo, la configuración del área afectada por la lluvia radiactiva a partir del "ala" de misiles Minuteman emplazada en la base aérea de Whiteman, en el centro del estado de Missouri, después de una ataque ruso realizado con dos explosiones en la superficie, de un megatón (con un rendimiento del 50 por ciento de la fisión), contra cada uno de los 150 silos con que cuenta la base. Supuesta una velocidad media del viento de 30 kilómetros por hora, la zona de lluvia radiactiva mortífera para personas bajo techado llegaría hasta la fron-



los de escuadrilla *(círculo gris)* **de Minuteman** *(2)* **y a dos cabezas nucleares en cada uno de los 150 silos de las 15 escuadrillas emplazadas en Whiteman** *(3 y 4)*. **La gran diferencia entre las dos áreas inferiores resulta de haber supuesto distintas velocidades del viento. En los cuatro casos se ha supuesto que el viento sopla hacia el este.**

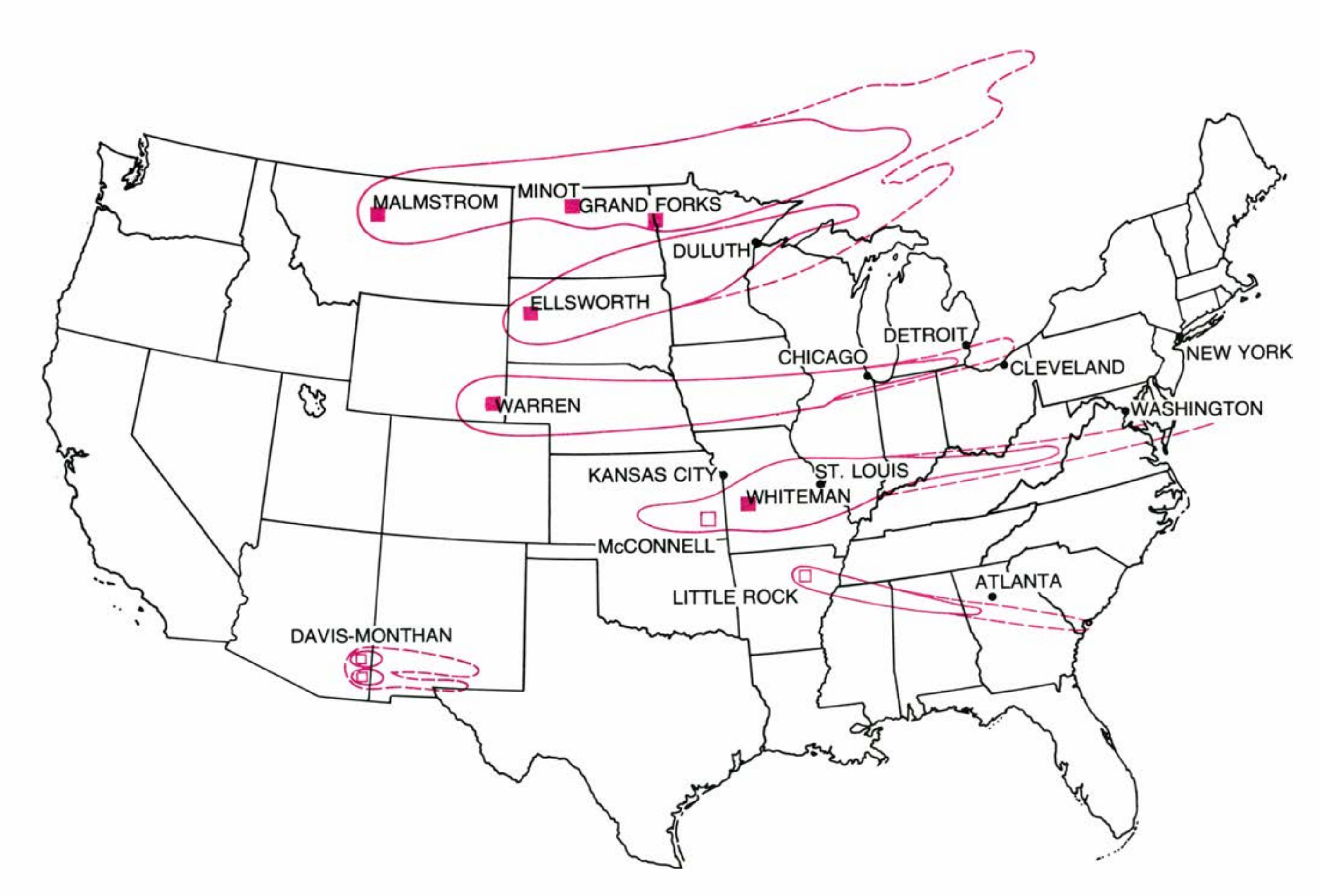
En los tres primeros ejemplos expuestos en la ilustración de la parte superior de la página opuesta, se ha supuesto que la velocidad del viento es constante, como de 30 kilómetros por hora. En el ejemplo inferior se ha supuesto una velocidad de 100 kilómetros por hora promediada a distintas altitudes situadas entre la superficie y la estratosfera.

tera entre los estados de Illinois e Indiana; con una velocidad media del viento de 100 kilómetros por hora (bastante frecuente en la troposfera, donde permanecerían las partículas radiactivas la mayor parte del tiempo, antes de caer al suelo) la zona en cuestión llegaría hasta los límites occidentales de Virginia *(véanse las ilustraciones de las páginas 20-21)*. El área delimitada por la línea de isointensidad correspondiente a la dosis mortífera sería muy extensa: un 2 por ciento más o menos de la superficie terrestre continental de los Estados Unidos.

Existen seis bases de misiles Minuteman, a partir de las cuales podrían originarse enormes campos de radiación mortífera comparables al descrito más arriba; además, hay también tres bases con 18 misiles Titan cada una. Así pues, en caso de que se produjera una acción de contragolpe contra los misiles norteamericanos, una parte importante de los Estados Unidos quedaría cubierta por las áreas afectadas por la radiación procedente de los miles de explosiones termonucleares. Por otra parte, una proporción considerable de la población, incluyendo los habitantes de algunas de las ciudades más importantes del Medio Oeste, quedaría comprendida en las zonas de radiación mortífera *(véase la ilustración inferior de esta página)*. Es de suponer que un mapa de la URSS mostraría una figura semejante tras un ataque de contragolpe norteamericano contra aquel país.

Las consecuencias que se deriven para una persona que quedara incluida en el área afectada por la lluvia radiactiva arrastrada por el viento desde una explosión por fisión en superficie o a poca altura dependerían, por supuesto, no sólo del grado de contaminación alcanzado en el suelo, sino también del lugar donde dicha persona encontrara refugio. Actualmente, el programa de defensa civil norteamericano exige, para que un local sea considerado refugio, que proteja contra toda radiación gamma procedente de la lluvia radiactiva, excepto de un 1 a un 2 por ciento de la misma. El grado de protección que ofrece un refugio se caracteriza por su "factor de protección", que es el inverso de la fracción de radiación que penetra en él. Por consiguiente, las normas actuales prevén un factor de protección de 50 a 100. Este nivel de protección se puede conseguir con una cubierta de unos 60 centímetros de tierra o 40 centímetros de hormigón. Aquellas partes de una casa de una sola planta que se encuentran por encima del nivel del suelo tienen un factor de protección de 3. El factor de protección de los sótanos oscila entre 30 y 40, si se hallan completamente bajo tierra y, por lo tanto, casi toda la radiación gamma que reciben procede de la lluvia radiactiva que cae sobre el tejado del edificio.

En los cálculos del Departamento de Defensa, la distribución de factores de protección que se da por supuesta corresponde a la hipótesis de que un 60 por ciento aproximadamente de los habitantes de los Estados Unidos se dirigirá al mejor refugio existente en cada área y podrá llegar hasta él *(véase la ilustración superior, en la página 23)*. A la población que no se dirija a ningún refugio o que



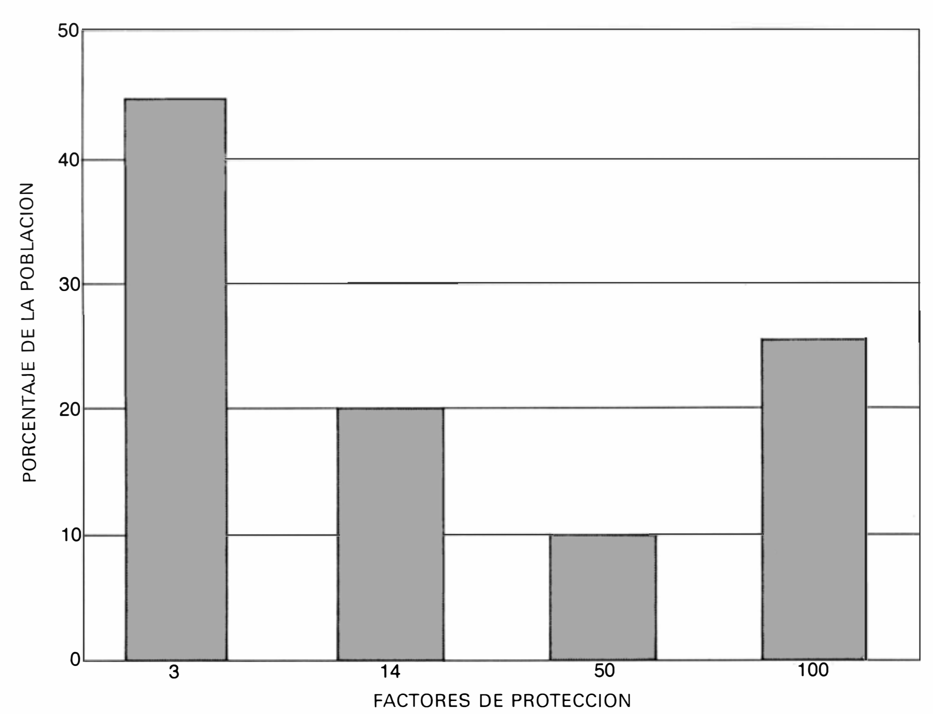
UN ATAQUE DE CONTRAGOLPE realizado contra todas las bases de ICBM de los tipos Titan *(cuadros blancos)* **y Minuteman** *(cuadros de color)*, **con dos explosiones de un megatón en superficie (50 por ciento del rendimiento de fisión) por cada silo, daría esta figura. Las líneas de isointensidad interiores delimitan las áreas con una dosis de 450 rems en locales cerrados (50 por ciento de muertos) y, las exteriores, las áreas con una dosis de 200 rems en las mismas condiciones (50 por ciento de hospitalizados). Las velocidades serían las del viento de marzo.**

no tenga ninguno a su disposición (el 40 por ciento restante) se le asigna un factor de protección de 3, correspondiente al de una vivienda normal. Se ha demostrado que, si se redujeran a la mitad los factores de protección, aumentaría la cifra de muertes en más del 50 por ciento.

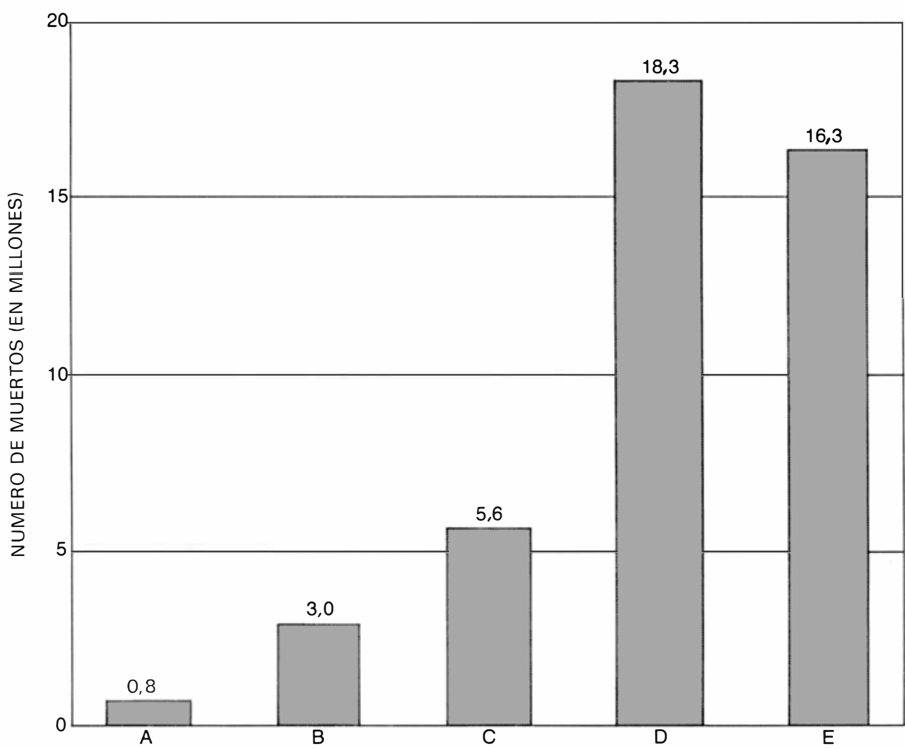
Téngase en cuenta que los analistas del Departamento de Defensa supusieron que la gente permanecería durante 30 días en los refugios. Dado el nivel actual de preparación de la defensa civil es muy poco probable que la población pudiera permanecer bien protegida durante un período de tiempo tan prolongado. Si se desea afrontar el problema de la guerra nuclear limitada como una opción estratégica –es decir, como una amenaza real en un enfrentamiento con la URSS– sería necesario mejorar considerablemente los refugios existentes. En otras palabras, los Estados Unidos tendrían que embarcarse en un programa de defensa civil mucho más vasto que el actual.

Efectivamente, se ha propuesto no hace mucho en el proyecto de presupuestos anuales de defensa de los Estados Unidos, como un anexo imprescindible en la nueva estrategia, la preparación de los procedimientos de defensa civil necesarios para realizar una evacuación masiva de la población, así como para buscarle nuevo alojamiento, durante los momentos críticos. Los preparativos exigidos para unos movimientos en masa de tanta envergadura, así como para el sustento de la población evacuada durante períodos prolongados, tendrían una profunda repercusión en la sociedad norteamericana en tiempo de paz. Los refugios bien identificados y los planes de evacuación no bastarían para constituir un programa eficaz de defensa civil; un sistema total debería organizarse en íntima relación con la vida civil, mediante programas de capacitación, ejercicios y actividades de carácter voluntario.

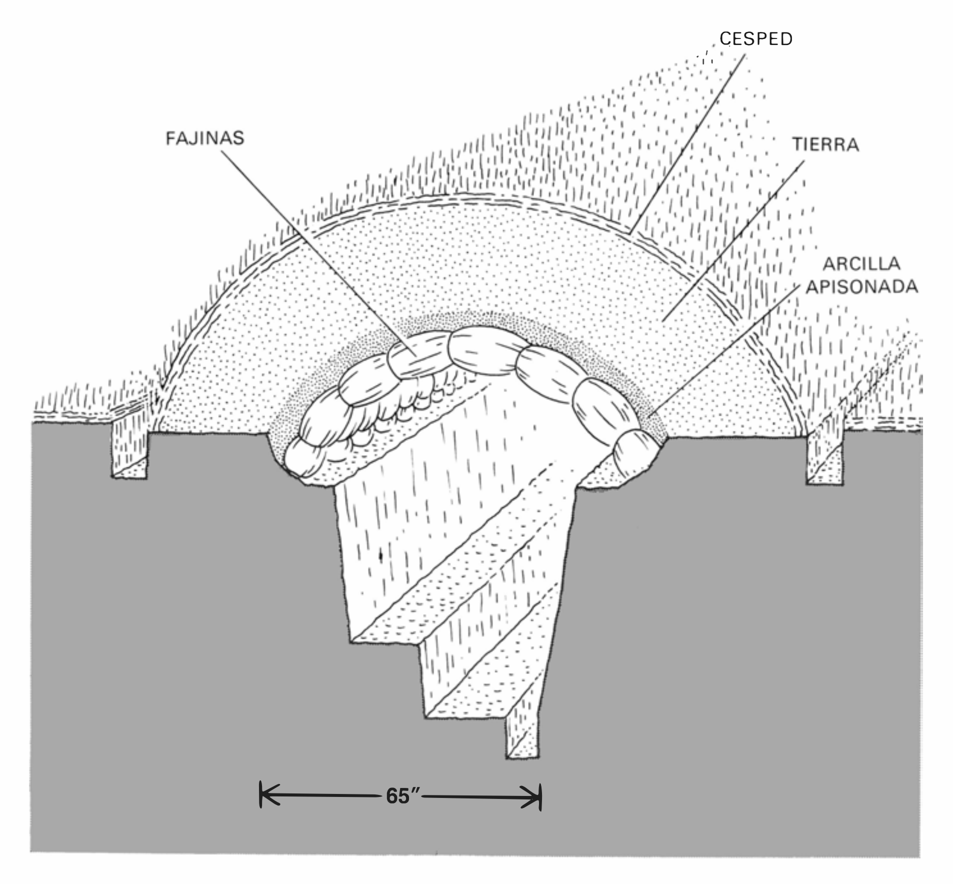
Se puede tener una idea de las dimensiones de un programa de defensa civil capaz de asegurar un alto grado de ocupación de los refugios y de mantenerlo durante varias semanas, si se examina el sistema previsto en la guía de defensa civil norteamericana de 1962. Los planes expuestos en la guía (que nunca fueron llevados a la práctica) suponían que, para cada refugio con una capacidad de 100 civiles, se necesitarían 25 personas desempeñando funciones operativas, de ellas unas 10 o 12 previamente capacitadas. Es decir, que el 10 por ciento de

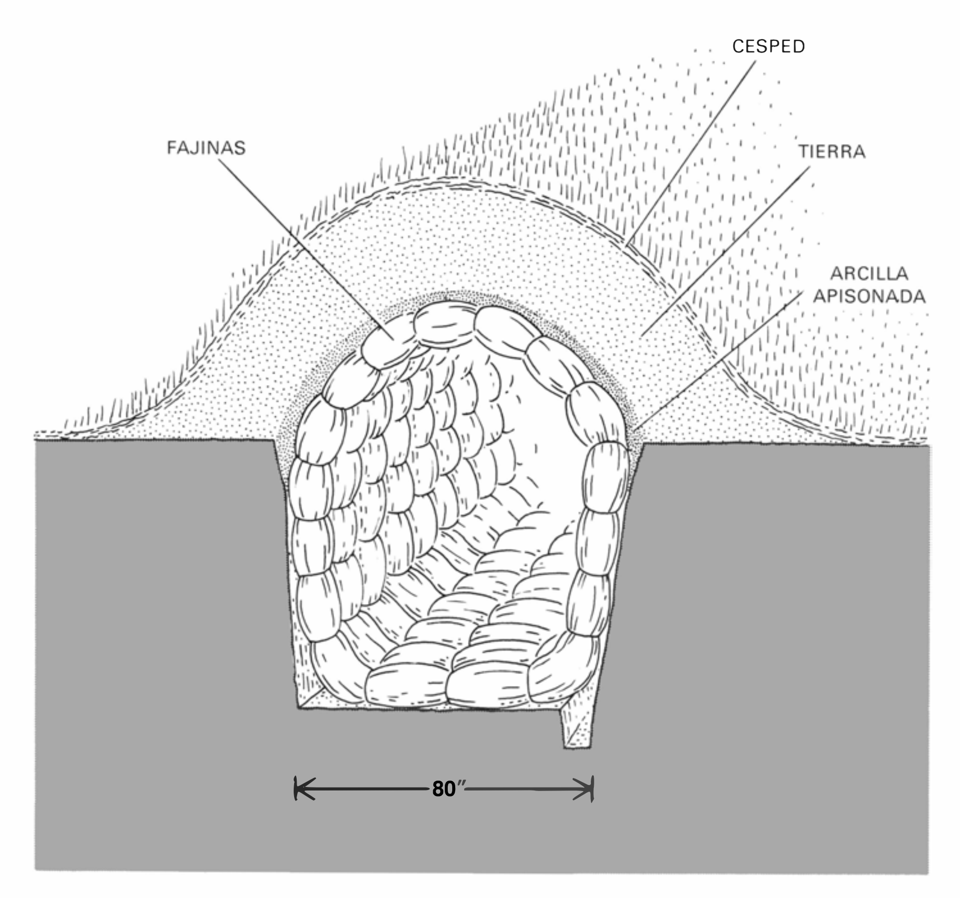


LA "DISPOSICION DE LOS REFUGIOS" en que se han basado los cálculos del Departamento de Defensa se indica en la figura mediante barras que muestran qué porcentaje de la población se halla protegida por refugios a los que se ha asignado un determinado "factor de protección" (igual al inverso de la proporción de radiación gamma que penetra en el refugio). La planta baja de una casa de un piso proporciona un factor de 3 aproximadamente; el sótano de una casa de madera podría dar un factor de 15 a 20, el de una casa de dos pisos, de hasta 50. Una zanja tapada con 60 cm de tierra da un factor de cerca de 100.



BALANCE DE MUERTOS de un supuesto ataque de contragolpe ruso: una explosión aérea de un megatón en cada silo de ICBM norteamericano *(A)*; el mismo ataque con explosiones en superficie *(B)*; dos cabezas nucleares de 550 kilotones en cada silo, una de ellas explosionando en superficie y la otra en el aire *(C)*; dos cabezas nucleares de 3 megatones en cada silo, una en superficie y la otra en el aire *(D)*; un ataque "completo", con dos explosiones en superficie, de un megatón cada una, contra cada silo y con explosiones aéreas sobre las 46 bases del Mando Aéreo Estratégico y las dos bases de submarinos lanzamisiles *(E)*. En los tres últimos casos, la "disposición de refugios" de la figura anterior se ha "degradado" un 25 por ciento y se han supuesto vientos de marzo, en lugar de los de agosto. En los tres últimos casos el Departamento de Defensa evaluó el ataque: 42 por ciento de los ICBM destruidos *(C)*; 80 por ciento destruidos *(D)*; 57 por ciento de los ICBM destruidos y graves daños a los aviones en tierra o en vuelo, a 13 km de la base, y a los submarinos *(E)*.





LOS REFUGIOS PROYECTADOS por los rusos, reproducidos aquí de un manual publicado en la URSS en 1970, se basan en estructuras que puede construir la población "utilizando materiales que se encuentren a mano y con su propio trabajo". Los abrigos ***(arriba)*** **cavados en suelo arcilloso firme se cubren con hileras de fajinas (ramas o cañas), arcilla y 75 centímetros de tierra. Los terrenos blandos necesitan anillados de fajinas** ***(abajo).***

la población protegida, equivalente al 20 por ciento de la población adulta, tendría que recibir cierta preparación específica. Para reclutar un personal de encuadramiento tan numeroso, las autoridades no podrían limitarse a recurrir a organizaciones públicas de seguridad y protección ya existentes, como la policía, los servicios de bomberos y las unidades de la Guardia Nacional.

Una de las misiones de este personal capacitado consistiría en mantener los sistemas de comunicación para distancias relativamente importantes, con el fin de solventar cualquier deficiencia de comida, agua o material sanitario a nivel local. También tendrían que saber manejar los intensímetros para medir la radiación, pues en el período inmediatamente posterior al ataque los niveles de lluvia radiactiva podrían variar considerablemente de un punto a otro. (Las partículas radiactivas, como la nieve, se acumulan en los lugares adonde son arrastradas, según el viento, el tiempo reinante y los obstáculos topográficos, edificios incluidos. Podrían existir bolsas relativamente seguras en el interior de áreas con niveles de radiación letales.) Este personal capacitado de encuadramiento tendría que desempeñar funciones de dirección en el largo período de extrema privación que seguiría al ataque, así como restablecer los servicios públicos de una sociedad con una gran proporción de sus ciudadanos enfermos, heridos y moribundos. Hay que tener en cuenta que los cálculos del Departamento de Defensa sobre las consecuencias de la guerra nuclear limitada pecan gravemente por defecto, casi con toda seguridad. Por ejemplo, estos cálculos omiten toda valoración de lo que puede constituir una de las consecuencias más graves a saber, la disgregación de los elementos rígidamente interdependientes que permiten el funcionamiento de las sociedades modernas. Pasan por alto simplemente las dificultades con que se enfrentaría una sociedad que intentara recuperar la normalidad con unos niveles de mortalidad y morbilidad sin ningún precedente, con una asistencia sanitaria insuficiente y con una grave desorganización en los abastecimientos de alimentos y agua. Además, los referidos cálculos omiten cualquier referencia a las consecuencias a largo plazo, como los millones de defectos genéticos y de casos de cáncer que se registrarían en todo el planeta, a lo largo de varias décadas después de producido el supuesto ataque nuclear.

Se necesitaría una conciencia y una preocupación públicas más profundas,

así como la disposición para participar en continuos ejercicios de defensa civil, si los Estados Unidos pretendieran poner en funcionamiento un sistema viable de evacuación y protección en masa. A falta de una preparación constante, el pánico y la desorganización más completa prevalecerían sin duda en los momentos del ataque. Es difícil ver cómo podría lograrse una identificación pública con estos planes sin una previa intensificación, deliberada y continua, de los temores populares acerca de la guerra nuclear. Una de las enseñanzas proporcionadas por el programa de defensa civil de 1961 y 1962, que era relativamente ineficaz, fue que las grandes inversiones en defensa civil y las incomodidades de un programa de construcción de refugios de cierta importancia, sólo podían aparecer justificados a ojos del público norteamericano si se exageraba la probabilidad de una guerra nuclear.

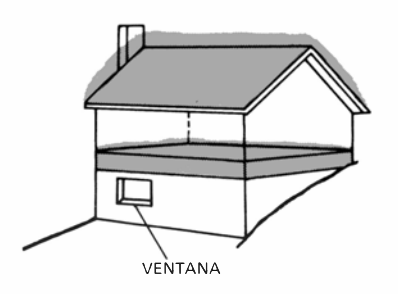
Vuelve hoy la creencia de que la URSS está poniendo a punto y ensayando determinados planes de defensa civil, en los que entra la evacuación de grandes masas de población, junto con la dispersión y el reforzamiento de la protección de su industria. Estos programas se aducen para sugerir que los Estados Unidos están perdiendo quizá su poder disuasorio y para incitar a que se redoblen los esfuerzos norteamericanos en materia de defensa civil. ¿Qué pruebas existen en apoyo de estas afirmaciones?

En la URSS se ha publicado mucho sobre este tema, y el problema de la defensa civil se ha divulgado entre la población con más intensidad que en los Estados Unidos. Al parecer, los rusos han gastado también más dinero en la preparación de planes y en organización, y han hecho intervenir en los ejercicios de defensa civil a un número limitado de personas imprescindibles dados sus conocimientos especializados. Sin embargo, ante un desastre a escala nacional y sin precedentes, como el que, según hemos visto, se produciría, cualquier programa eficaz de defensa civil tendría que incluir entre sus puntos esenciales maniobras de carácter general y ejercicios de supervivencia con intervención de toda la población. Si se hubieran realizado ejercicios de este tipo, lo habríamos sabido. En efecto, habrían sido muy difíciles de ocultar y muchos de los posibles participantes en ellos o que se hubieran enterado de su existencia han abandonado la URSS con posterioridad y habrían llamado la atención sobre los mismos. Sin embargo, nadie ha presentado pruebas de que se hayan realizado. El director de la traducción oficial norteamericana del manual reglamentario ruso de defensa civil para 1974 advierte que "la Unión Soviética no ha llegado a experimentar, entre la población y a gran escala, sus refugios ni ha realizado siquiera ejercicios simulados como los que han tenido lugar en los Estados Unidos". Los planes y las maniobras son algo muy distinto de un sistema efectivamente operativo.

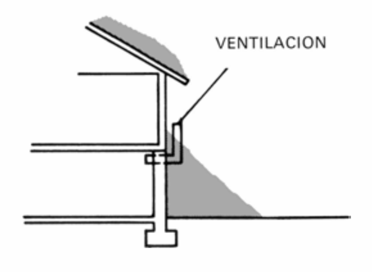
La respuesta presentada por el Departamento de Defensa en julio de 1975 contenía nuevas cifras sobre el número de bajas, así como estimaciones acerca de la eficacia militar de los supuestos ataques. De acuerdo con los nuevos cálculos, un ataque a base de dos cabezas nucleares de 550 kilotones, una de ellas explosionando en superficie y la otra en el aire, contra cada uno de los 1054 silos de ICBM norteamericanos ocasionaría 5,6 millones de muertes (suponiendo una reducción del 25 por ciento de los factores de protección de la población antes indicados) y destruiría sólo el 42 por ciento de los silos. Un ataque más importante, con dos cabezas nucleares de 3 megatones, una en superficie y la otra en el aire, dirigidas a cada silo, ocasionaría 18,3 millones de muertos y destruiría el 80 por ciento de los silos. Un ataque "completo", con dos explosiones en superficie, de un megatón cada una, contra cada silo de ICBM y con acciones dirigidas contra las 46 bases del Mando aéreo estratégico (SAC) y las dos bases de submarinos lanzamisiles, produciría 16,3 millones de muertos y destruiría el 57 por ciento de los ICBM, el 60 por ciento de los bombarderos sorprendidos en tierra y el 90 por ciento de los submarinos fondeados en sus bases *(véase la ilustración inferior de la pág. 23)*.

La eficacia de esos ataques sería algo mayor suponiendo que los misiles enemigos tuvieran una mayor precisión, y algo menor suponiendo que las fuerzas atacantes presentaran un grado de fiabilidad inferior al 100 por ciento. Otro factor que hay que tener en cuenta en los ataques en masa, con intervención de muchas cabezas nucleares que alcanzan sus objetivos aproximadamente al mismo tiempo y en la misma zona, es el "fratricidio" entre los misiles atacantes. En un ataque concentrado, en efecto, las perturbaciones atmosféricas creadas por las primeras cabezas nucleares que llegan a sus objetivos, forzosamente tienen que destruir, dañar o desviar muchas de las cabezas que siguen a continuación. Solamente una sincronización casi perfecta en la llegada de los misiles dirigidos contra un mismo silo o contra silos contiguos puede evitar este efecto.

En todo caso, es evidente que incluso mediante un ataque en masa, que produciría una devastación enorme, con la muerte directa de 20 millones de norteamericanos, la URSS sólo habría obtenido unos resultados de valor estratégico militar muy escaso. Incluso después de los







EL PROYECTO DE REFUGIO estadounidense, representado aquí a partir de unas ilustraciones publicadas por la Defense Civil Preparedness Agency, sirve para construir un "refugio improvisado" para acoger personas evacuadas. A fin de proporcionar una protección adecuada contra la lluvia radiactiva, en los sótanos que sólo se hallan en parte bajo el nivel del terreno es necesario colocar una capa de 30 centímetros de tierra debidamente fijada en el tejado y amontonar tierra bien apisonada contra los muros cuyas fachadas den al exterior.

ataques más intensos contra los ICBM, de entre los previstos por el Departamento de Defensa, sobrevivirían más de 200 ICBM, que constituirían una fuerza de respuesta arrolladora, aunque no se tengan en cuenta los bombarderos del SAC, los submarinos lanzamisiles y los miles de armas nucleares técticas norteamericanas desplegadas en ultramar y situadas a bordo de los portaviones. Así pues, es engañoso, cuando menos, suponer que un ataque de contragolpe, realizado con éxito y estratégicamente efectivo, podría llevarse a cabo sin ocasionar demasiadas bajas.

Uno de los peligros más grave, que significaría cualquier nuevo enfoque estratégico que pusiera el acento en la preparación para intervenir realmente en una guerra de contragolpe limitada, es que tendería a socavar la estabilidad del equilibrio estratégico. Una cosa es la flexibilidad y otra, muy distinta, la capacidad de destruir con eficacia objetivos reforzados. La flexibilidad, en efecto, es el resultado lógico de la amplia gama de armas estratégicas de que disponen los Estados Unidos, dirigidas contra una gran variedad de objetivos, militares, urbanos o industriales. Cada una de estas armas, o un centenar de ellas por ejemplo, podría lanzarse selectivamente. Por otra parte, cada misil o bombardero puede dirigirse opcionalmente contra múltiples objetivos. El nuevo sistema de *Command Data Buffer* (Memoria de datos de mando), actualmente en fase de terminación, permite reasignar, a distancia y en 36 minutos, los objetivos en los ordenadores situados a bordo de los misiles Minuteman III, operación que se efectúa desde los centros de control de lanzamiento.

Debido a esta gran flexibilidad, los Estados Unidos poseen ya una considerable capacidad de contragolpe, incluso sin contar con las cabezas nucleares de alta precisión. Existen, por ejemplo, objetivos militares sin protección o "blandos", como aeropuertos y bases de submarinos, que podrían destruirse de modo selectivo con unas pocas cabezas atómicas. Incluso los silos reforzados para misiles podrían destruirse alcanzándolos uno a uno con varios misiles Minuteman. A pesar de todo, sin embargo, el Departamento de Defensa no se considera satisfecho: quiere tener la posibilidad de realizar acciones de contragolpe eficazmente y con resultados seguros contra los silos reforzados de los ICBM rusos. En efecto, en su solicitud de asignación presupuestaria de 1976, Schlesinger declaró: "Creo que tenemos que mejorar nuestra capacidad para destruir objetivos reforzados, de manera que podamos tener más confianza en la ejecución de ataques limitados contra dichos objetivos". En la actualidad, los Estados Unidos avanzan realmente hacia esta meta, mediante programas dotados en los presupuestos públicos.

El camino así emprendido choca directamente con la necesidad de estabilidad estratégica. Una fuerza de misiles como la que tienen los norteamericanos, dotada de vehículos de reentrada con objetivos múltiples asignables independientemente (MIRV) o de vehículos de reentrada maniobrables (MARV), actualmente en fase de puesta a punto, y poseyendo además una combinación probada de fiabilidad muy elevada, sistemas de guía muy exactos y cabezas nucleares de alto rendimiento, podría hacer pensar a los dirigentes rusos en la posibilidad de una acción preventiva norteamericana contra sus silos de ICBM. Les induciría a creer, además, que, en el momento de enfrentamiento, no deberían dejarse sorprender con sus misiles encerrados en los correspondientes silos, que en ese momento deberían actuar antes que el adversario, o bien adoptar una política de "dedo en el gatillo", de estado de alerta para el lanzamiento. Estos mismos argumentos se aplican cambiando el rol, entre rusos y norteamericanos. La controversia que tiene lugar actualmente en los Estados Unidos, a nivel nacional, indica que existe una lógica preocupación general ante la posibilidad de que la URSS pueda estar desarrollando su capacidad para realizar ataques de contragolpe contra objetivos reforzados, a la vista del aumento de tamaño de los ICBM rusos.

Por supuesto, es imposible concebir una acción preventiva que amenace de verdad la capacidad de respuesta de la URSS (o de los Estados Unidos), aunque sólo sea porque los submarinos lanzamisiles en alta mar y los bombarderos en pleno vuelo o en estado de alerta no pueden resultar destruidos en un ataque de este tipo. Sin embargo, para mantener la situación de estabilidad estratégica que reina actualmente entre ambas superpotencias, es necesario que no exista una vulnerabilidad –ni real ni "sentida"– de ninguno de los elementos principales que componen las fuerzas de disuasión estratégica de los dos bandos. (Desde el punto de vista ruso, esto se aplica en particular a los ICBM con base en tierra, dado que en conjunto constituyen una parte mucho más importante de su poder de disuasión que para los Estados Unidos: el 75 por ciento en el caso de la URSS contra el 25 por ciento para los norteamericanos.) Por consiguiente, el despliegue de misiles capaces de destruir objetivos reforzados crearía tensiones, ya que cada bando temería que dicho despliegue pudiera constituir, a fin de cuentas, una amenaza efectiva de ataque preventivo contra sus propias fuerzas de ICBM basadas en silos reforzados. Para el caso, el hecho de que las enormes dificultades técnicas y operacionales, como el problema del "fratricidio", hagan dudar a mucha gente de que se pueda alcanzar esta capacidad, casi no tiene importancia; en efecto, siempre quedaría la duda de que algún ICBM con base en tierra saliera indemne de un primer golpe preventivo.

Los militares norteamericanos saben del peligro que supone amenazar, aunque sea en apariencia, la capacidad rusa de respuesta; por esa razón, acompañan sus propuestas en favor de una mejora de capacidad de destrucción de objetivos reforzados con la afirmación de que este despliegue de nuevas armas ofensivas sería limitado, al menos de momento. Pero, ¿se puede habilitar un potencial limitado de contragolpe contra silos "duros" sin provocar los mismos efectos nocivos que tendría una capacidad más importante? Después de todo, el único argumento aducido en apoyo de los continuos programas de mejora de los misiles norteamericanos ha sido el miedo a la posible amenaza de un futuro ataque de contragolpe por ICBM rusos contra los misiles Minuteman norteamericanos. Se ha dicho que los norteamericanos deben poder responder con la misma moneda a todas y cada una de las amenazas potenciales previsibles. Schlesinger ha declarado que no debía haber "ninguna asimetría percibible, ni en el nivel ni en la capacidad de las respectivas fuerzas, tanto tradicionales como nucleares".

El peligro de este razonamiento es que, casi fatalmente, el programa de desarrollo armamentístico norteamericano empujará a los rusos a lanzarse al desarrollo del mismo programa que los Estados Unidos temen (y viceversa, naturalmente). Todos los precedentes, entre ellos el caso de la entrada en servicio de misiles del tipo MIRV en ambos bandos, indican que, una vez puestas a punto las técnicas necesarias y luego de haber comprobado que darían buen resultado en un posible ataque de contragolpe contra objetivos reforzados, la dinámica de la carrera de armamentos nucleares entrará en funcionamiento; entonces, será difícil, si no imposible, que

los Estados Unidos duden en proveerse abundantemente de nuevas armas, y la URSS tampoco podrá librarse de responder con la misma moneda.

Ninguno de los dos bandos ha puesto a punto todavía armamento proyectado específicamente para eliminar objetivos reforzados; es decir, armas capaces de destruir, con toda probabilidad, un objetivo militar reforzado o "duro", como pueda ser un silo subterráneo, utilizando para ello una sola cabeza nuclear. Sin embargo, en el presupuesto de defensa de los Estados Unidos para el año en curso, se han asignado fondos para programas de investigación y desarrollo encaminados a este fin. Por lo tanto, antes de que ambos países se comprometan más seriamente y quizá de manera irrevocable en la realización de programas –recíprocamente estimulados y mutuamente reforzados– para el desarrollo de tales armas, es necesario plantearnos unos interrogantes inevitables. ¿Se quieren y se necesitan esas armas? ¿Qué sentido tiene ser capaz de destruir un silo enemigo (que quizá se encuentre vacío cuando lo alcance la cabeza atómica) en respuesta a un ataque contra el propio silo? Si se desea dar una réplica limitada, ¿no constituiría un buen blanco cualquier base aérea o naval, o bien un depósito militar? ¿Acaso no es adecuada la actual flexibilidad, de tan amplio espectro? Las armas destinadas a una acción de contragolpe dirigida a objetivos reforzados, ¿constituyen una contribución militar obligada a la seguridad nacional o se justifican exclusivamente en una efímera discusión político-estratégica?

Hemos explicado ya que tales armas complicarían el problema de mantener la estabilidad estratégica. Parece, pues, que evitar su puesta a punto y su despliegue sería útil para la seguridad de los Estados Unidos y de la URSS. Un precedente significativo a este respecto lo constituye el tratado (negociado en la primera serie de conversaciones sobre la limitación de armas estratégicas) que reduce estrictamente las defensas contra misiles balísticos. Ahora, una vez más, los Estados Unidos y la URSS tienen una ocasión decisivamente importante para limitar su tradicional competencia en la tecnología bélica; para ello, deberían detener las pruebas y la puesta en servicio de nuevas armas destinadas a destruir silos reforzados de ICBM.

En los treinta años transcurridos desde Hiroshima y Nagasaki, se han producido muchas crisis en las que se han visto implicadas las dos superpotencias; los Estados Unidos, además, han intervenido en dos importantes guerras continentales, en Asia. A pesar de todo, sin embargo, la tregua armada nuclear no se ha roto. ¿A qué se debe que ninguno de los dos bandos haya lanzado ni una sola de los miles de cabezas "nucleares" que tiene en servicio? La razón, sin duda alguna, es que los dirigentes y los ciudadanos de ambos países tienen un miedo atroz a que, una vez haya explosionado un arma nuclear, la réplica sea otra explosión, con sucesivos ataques mutuos, cada vez más devastadores, hasta que ambas naciones queden destruidas y millones de personas muertas y heridas. El nuevo enfoque basado en una estrategia de contragolpe dirigida selectivamente contra objetivos reforzados, acompañada de intensos esfuerzos en materia de defensa civil, plantea una cuestión de fondo, a saber, si existen o no perspectivas reales de eludir este "equilibrio por el terror". Hemos de preguntarnos si la suposición de que una guerra nuclear generalizada se evita gracias a la certeza de la mutua destrucción debe abandonarse en favor de otro objetivo, consistente en intervenir en una guerra nuclear limitada, ganarla y "sobrevivir" a ella, cuando todo indica que incluso una fuerza limitada ocasionaría muchos millones de muertos.

Durante el decenio 1960-1969, los Estados Unidos escogieron una opción estratégica que daba la máxima prioridad a la prevención de la guerra nuclear, por medio de la disuasión más que preparándose para intervenir en guerras nucleares, si fallaba aquélla. Desde entonces, las técnicas bélicas han registrado un progreso notable, de tal manera que hoy en día pueden tomarse en consideración seriamente ciertos tipos nuevos de acciones limitadas de contragolpe, más perfeccionadas, incluyendo los ataques contra objetivos militares reforzados. Sin embargo, la realidad política de la disuasión permanece inalterada. Las nuevas técnicas y la nueva estrategia no reducen significativamente el peligro de que estalle una guerra nuclear total una vez se haya disparado la primera arma nuclear.

Conviene tener en cuenta que, una vez cruzada la fatídica línea nuclear, la decisión de mantener una guerra dentro de determinados límites ya no depende de un solo bando; tienen que tomarla los dos –o más– participantes en el conflicto. Tal como escribió el secretario de Estado Henry A. Kissinger en 1965, "nadie sabe cómo reaccionarán los gobiernos y los pueblos ante una explosión nuclear en el caso de que ambos bandos posean vastos arsenales".

Metabolismo de los glicéridos en el tejido adiposo

El metabolismo de las grasas es más activo de lo que se venía creyendo. Una fracción importante del mismo en el tejido adiposo es controlada por la gliceroquinasa, un enzima que se creía inexistente en dicho tejido

Emilio Herrera

Por unidad de peso, las grasas tienen más del doble poder calorífico que los carbohidratos, por lo que constituyen la forma principal de acúmulo de energía en el organismo.

Cuando quemamos madera o gasolina, estamos realizando una oxidación de enlaces de carbono e hidrógeno (C-H), en cuyo proceso se libera energía. Esta energía puede ser aprovechada de forma mecánica para el movimiento de la maquinaria de una industria o de un automóvil, pero el rendimiento es limitado debido a la pérdida de una considerable cantidad de energía en forma de calor. En última instancia, algo parecido es lo que ocurre en el organismo animal. En presencia de oxígeno rompemos enlaces C-H de los principios inmediatos (carbohidratos, grasas y proteínas), liberando energía, que utilizamos, en parte, para los procesos fisiológicos y, en parte, la perdemos en forma de calor. Las plantas verdes han logrado escaparse de esta dependencia de "carburantes metabólicos" exógenos para satisfacer sus procesos vitales, ya que, gracias a la clorofila, aprovechan la energía solar para sintetizar los enlaces C-H a expensas de anhídrido carbónico (CO_2) y agua (H_2O).

Para evitar el depender ininterrumpidamente de enlaces C-H de procedencia exógena, necesitamos poderlos acumular en forma de reservas energéticas. Las grasas y los carbohidratos son las dos formas principales de acúmulo de energía metabólica en los seres vivos. Las grasas o lípidos son moléculas insolubles en agua y solubles en solventes orgánicos, tales como el cloroformo. Las grasas que tienen un papel de reserva energética en el organismo son los ácidos grasos y los glicéridos *(véase la ilustración de la pág. 33)*. Los carbohidratos o sacáridos son polihidroxialdehídos o polihidroxiacetonas, así como sus derivados, que poseen como fórmula empírica $(CH_2O)n$. Entre los carbohidratos se encuentran los monosacáridos, como la glucosa o la fructosa *(véase la ilustración de la pág. 29)*, y los polisacáridos, como el glucógeno, que está constituido por la unión de numerosas moléculas de glucosa.

Los carbohidratos contienen un radical hidroxilo (–OH) prácticamente por cada átomo de carbono, por lo que solamente tienen la capacidad potencial de oxidar un enlace C–H. Por el contrario, casi todos los átomos de carbono de las grasas tienen dos enlaces con átomos de hidrógeno (dos enlaces C–H), con capacidad potencial para ser oxidados. En consecuencia, no extraña el hecho de que, por unidad de peso, obtengamos más de doble cantidad de energía en la oxidación de una grasa que en la de un carbohidrato. En concreto, por cada gramo de triglicérido que oxidamos totalmente hasta resolverlo en CO_2, obtenemos 9,4 Calorías, mientras que por cada gramo de carbohidrato recabamos solamente 4 Calorías.

Los anteriores razonamientos nos permiten comprender por qué los animales acumulamos nuestra energía metabólica preferentemente en forma de grasas, siendo el tejido adiposo el que mejor se ha adaptado para realizar esta función. También se comprende por qué la actividad de síntesis de los ácidos grasos (lipogénesis) es más activa cuanto más activo es el animal. Esto es especialmente cierto en el caso de las aves voladoras, que, por moverse en contra de la gravedad, tienen los mayores problemas para el acúmulo de suficiente energía. Ello lo compensan con una elevada actividad lipogenética y una aumentada capacidad para acumular grasas de reserva.

Durante muchos años se ha venido considerando que los lípidos de los tejidos eran elementos de reserva calorigénica para el animal y que formaban un material estático, el cual únicamente se sintetizaba o se consumía en casos de un desequilibrio metabólico en su organismo, como puede ocurrir en el ayuno. En contra de esta creencia, bastante generalizada, Schoenheimer y Rittenberg administraron, en 1938, ácidos grasos radiactivos, a ratones, demostrando que, a los cuatro días del tratamiento, una gran proporción de las grasas de reserva de estos animales se habían marcado con radiactividad. Puesto que la masa total de las grasas acumuladas permaneció constante, estos resultados demostraban que el material radiactivo había reemplazado a las grasas que se habían movilizado durante el tiempo de la experiencia. Esta demostración del *estado dinámico* de las grasas es la base fundamental de nuestro conocimiento del metabolismo lipídico.

La síntesis de los ácidos grasos o lipogénesis se realiza en todos los tejidos de nuestro organismo a partir de carbohidratos y aminoácidos. Unos y otros, en su mayor parte, se transforman dando piruvato; éste, una vez oxidado y descarboxilado, da lugar a ácido acético activo (acetil-CoA), que es considerado el sustrato principal de la lipogénesis *(véase la ilustración de la página 30)*.

La mayor parte de las grasas que se acumulan en el organismo no se encuentran en forma de ácidos grasos libres, sino en forma de triglicéridos, que son los ésteres de dichos ácidos con el glicerol.

Ya hemos visto que el piruvato puede ser utilizado para la síntesis de los ácidos grasos. También el piruvato puede ser utilizado para la síntesis del glicerol

GLICERIDO (TRIPALMITINA)

ACIDO GRASO (ACIDO OLEICO)

GRASAS

MONOSACARIDOS = GLUCOSA

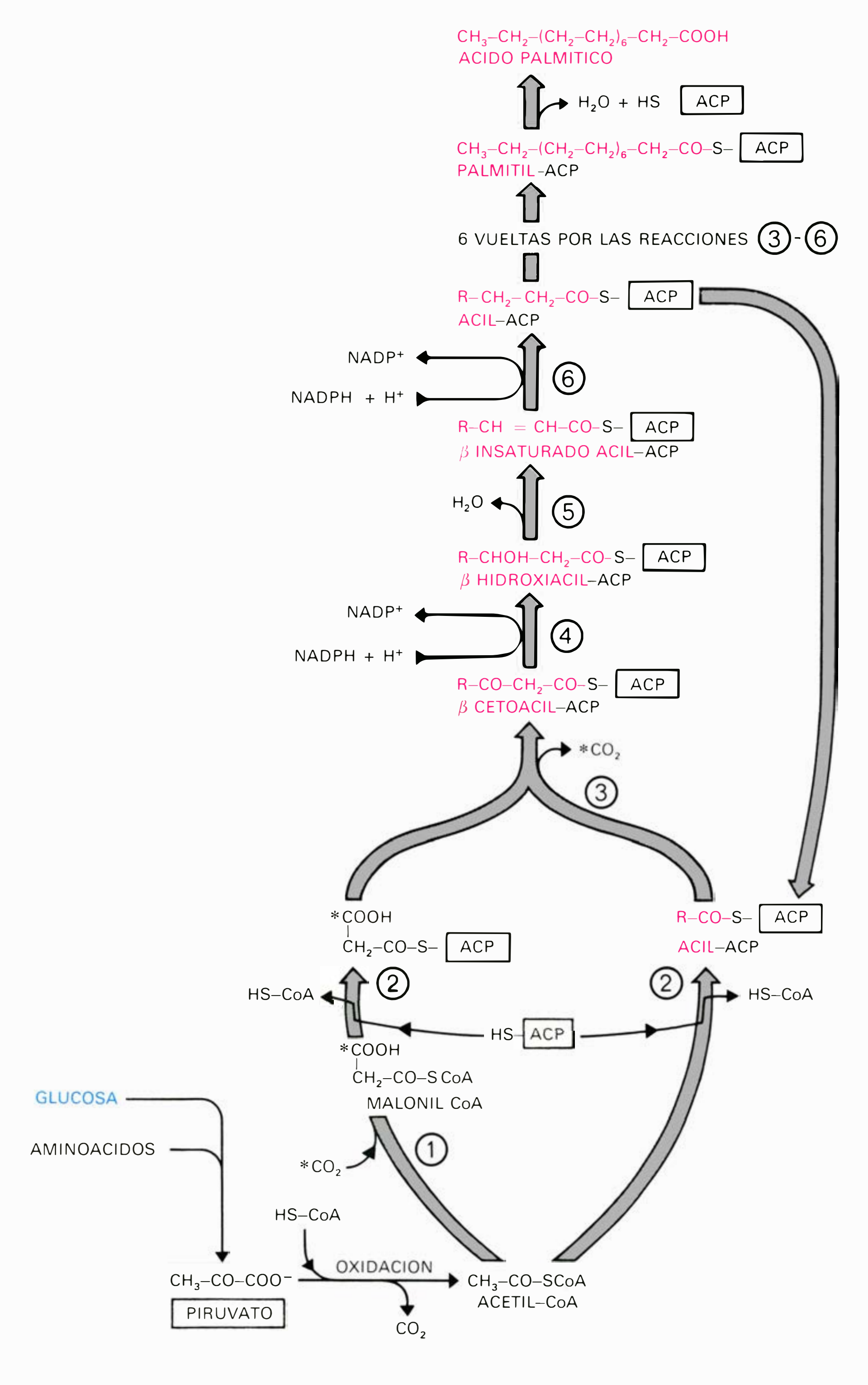
FRUCTOSA

CARBOHIDRATOS

DIFERENCIAS ESTRUCTURALES entre grasas y carbohidratos. La mayoría de los átomos de carbono de las grasas (en este caso un triglicérido, la tripalmitina o éster del glicerol con tres moléculas de ácido palmítico, y un ácido graso, el ácido oleico) carecen de oxígeno, mientras que en los carbohidratos cada átomo de carbono contiene un hidroxilo (–OH), por lo que sus moléculas se encuentran más oxidadas.

que es esterificado con dichos ácidos grasos en las moléculas de triglicéridos (glicerol de glicéridos). El que el piruvato sea utilizado para formar ácidos grasos o para formar glicerol de glicéridos depende de la situación alimentaria del animal. En una serie de experimentos que realizamos para estudiar la actividad metabólica de gluconeogénesis (síntesis de glucosa) a partir de piruvato radiactivo en ratas alimentadas y en ratas en ayunas de 24 horas, determinamos la cantidad de radiactividad incorporada a los glicéridos del hígado. Inyectamos piruvato marcado con C^{14} en el carbono en posición 3 ($C^{14}H_3$-CO-COO^-), a través de una vena de la cola, a las ratas experimentales; a los 30 min de la inyección, extrajimos y purificamos los lípidos del hígado. La incorporación de radiactividad a las grasas hepáticas fue superior en las ratas en ayunas que en las alimentadas *(véase la ilustración de la página 31)*. Esto significa que el ayuno vaya asociado a una activación de la síntesis de ácidos grasos, sino todo lo contrario, como lo demuestra el desglose de los componentes que constituyen esas grasas radiactivas. Así, cuando los animales que recibían el piruvato radiactivo estaban alimentados, más de un 50 por ciento de la radiactividad encontrada en las grasas del hígado apareció en forma de ácidos grasos, estando constituido el resto por la radiactividad en glicerol de glicéridos. Sin embargo, cuando los animales estaban en ayunas, solamente un 3 por ciento de la radiactividad en las grasas del hígado apareció en forma de ácidos grasos, mientras que un 97 por ciento lo estaba en forma de glicerol de glicéridos.

En consecuencia, tras el ayuno, la síntesis de ácidos grasos (lipogénesis) está inhibida, mientras que la síntesis de glicerol de glicéridos está aumentada. Puesto que en el mismo experimento determinamos la cantidad de piruvato radiactivo convertida en glucosa, pudimos correlacionar la actividad gluconeogenética con los parámetros anteriormente citados. Como puede observarse (*véase la ilustración de la página 31*), la variación de la síntesis de glicerol de glicéridos con el ayuno es paralela a la de la actividad de gluconeogénesis. Así pues, cuando la lipogénesis está inhibida con el ayuno, el hígado continúa fabricando glicéridos, el glicerol de los mismos lo sintetiza a partir de sustratos gluconeogenéticos, como es el piruvato o los aminoácidos, mientras que los ácidos grasos han de proceder de fuentes extrahepáticas. Estas fuentes extrahepáticas de ácidos grasos son, en su mayor parte, los depósitos de glicéridos en el tejido adiposo, los cuales son hidrolizados por la acción de un enzima, la lipasa dependiente de las hormonas (denominada así porque su actividad es fácilmente regulable por variaciones en los niveles de numerosas hormonas en sangre; su actividad se aumenta por la adrenalina y la noradrenalina, la hormona del crecimiento, el ACTH, el TSH, etcétera, e inhibida por la insulina y las prostaglandinas). En la hidrólisis de los glicéridos en tejido adiposo (lipólisis), se forman glicerol y ácidos grasos libres; estos últimos, acoplados a moléculas de una proteína, la albúmina, son transpor-



LA LIPOGENESIS o síntesis de ácidos grasos se realiza a partir de piruvato, que se forma a partir de la glucosa o de los aminoácidos. El piruvato se decarboxila (pérdida de CO_2) y oxida, transformándose en la forma activa del ácido acético, el acetil-CoA, que pasa a malonil-CoA por carboxilación (reacción 1). Una molécula de malonil-CoA y otra de acetil-CoA pierden sus radicales de Coenzima-A (HS-CoA) al unirse al terminal tiol (HS–) de una proteína específica, que se conoce como ACP (de su denominación inglesa, acyl-carrier protein, o proteína transportadora de grupos acilos) (reacciones 2), acoplándose entre sí con pérdida del anhídrido carbónico que se había incorporado al acetil-CoA inicial en la formación del malonil-CoA ($*CO_2$). En el acoplamiento se forma una molécula de β-cetoacil-ACP (reacción 3). Mediante una serie de reacciones (reacciones 4 a la 6), el grupo cetónico (–CO–) es reducido a radical metileno ($-CH_2-$), a expensas de la oxidación de coenzimas reducidos ($NADPH + H^+$). De esta forma, mediante la repetición secuencial de las reacciones 3 a la 6, se va formando la molécula del ácido graso de dos en dos átomos de carbono. En cada vuelta se consume una nueva molécula de acetil-CoA (reacción 1), que va aportando los dos átomos de carbono correspondientes. Una vez formada la cadena del ácido graso, éste se libera de la proteína transportadora, quedando en ácido graso libre. Cada reacción es sintetizada por enzimas específicos. A excepción de la formación de acetil-CoA a partir del piruvato, las reacciones se realizan en el espacio extramitocondrial de la célula.

tados por la sangre al hígado. Para comprobar esta interpretación, nosotros hemos incubado "in vitro" trozos de tejido adiposo de ratas alimentadas y de ratas en ayunas, en un medio isotónico conteniendo todos los iones necesarios para el funcionamiento normal de las células, y albúmina bovina purificada, capaz de ligar a los ácidos grasos que salen al medio de incubación. Determinando la producción neta del glicerol por el tejido en función del tiempo de incubación y corrigiéndola mediante la reutilización de este metabolito por el mismo tejido, hemos podido calcular la actividad lipolítica correspondiente; es decir, la cantidad de las moléculas de glicerol liberadas por el tejido a distintos tiempos de incubación, como resultado de la hidrólisis de los triglicéridos intracelulares. La lipólisis o movilización de los triglicéridos del tejido adiposo de animales en ayunas es muy superior a la de animales alimentados *(véase la ilustración de la página 31)*. Extrapolando estos resultados al animal "in vivo", podemos concluir que, en ayunas, es el tejido adiposo el que está aportando los ácidos grasos que aparecen en el hígado. La capacidad del hígado para acumular glicéridos es limitada; mientras que, en el animal alimentado, los glicéridos formados en el hígado vuelven a la sangre en forma de lipoproteínas para ser acumulados en tejidos extrahepáticos, en ayunas, los ácidos grasos derivados de aquéllos son oxidados para la formación de los llamados cuerpos cetónicos, o incluso se oxidan hasta su degradación completa en CO_2.

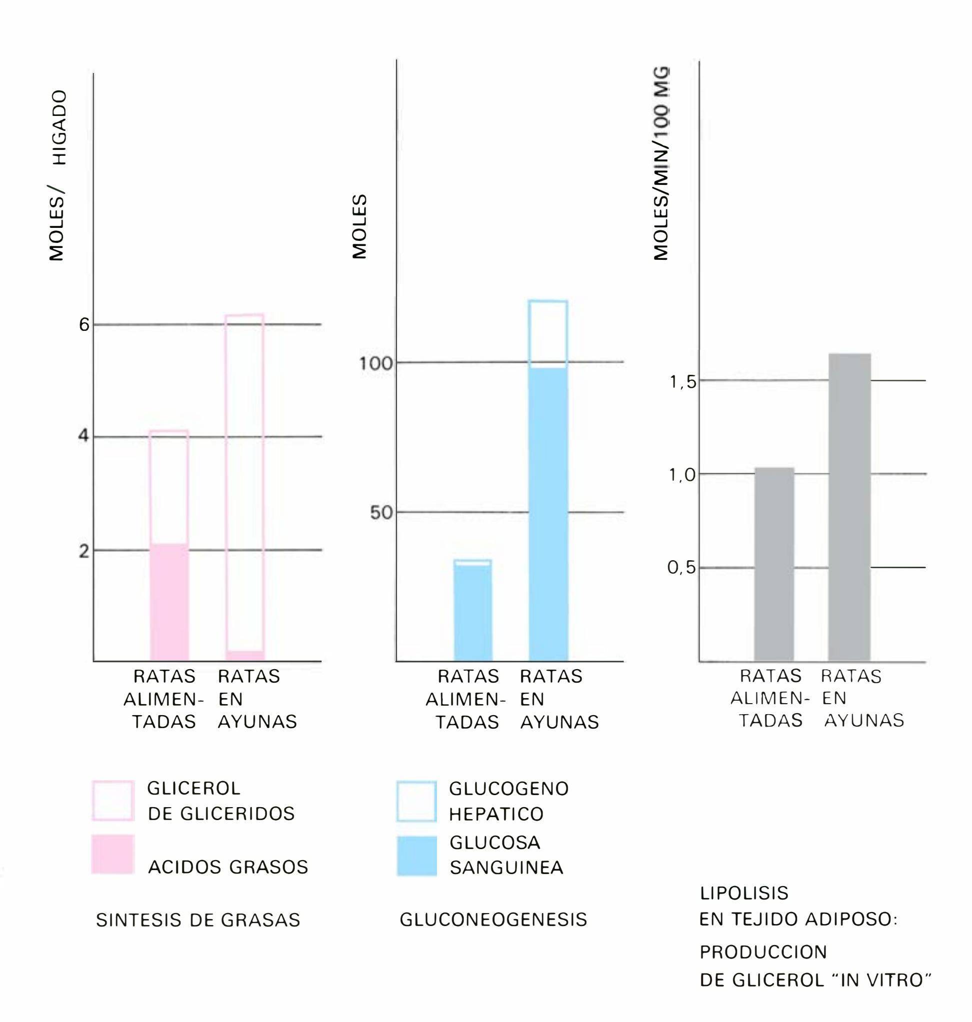
Es importante tener en cuenta que, aunque los ácidos grasos pueden ser utilizados como principal fuente de energía para la célula, ellos no pueden ser transformados en carbohidratos ni en proteínas, perdiéndose sus átomos de carbono en forma de CO_2, que se elimina. En consecuencia, el proceso es totalmente unidireccional: la glucosa (derivada de su reserva hepática en forma de glucógeno o de absorción intestinal como producto de la digestión de los carbohidratos de la dieta o bien de la síntesis endógena *(véase la ilustración de la página 33)* y los aminoácidos (en su mayor parte derivados de la degradación de proteínas) pueden llegar a transformarse en ácidos grasos, mientras que éstos no pueden formar ni glucosa ni aminoácidos, sino que se acumulan en forma de glicéridos o se oxidan hasta CO_2 *(véase la ilustración de la página 33)*.

Como se vio, los glicéridos están constituidos por un cuerpo con largas patas laterales. El cuerpo está formado por una

molécula de glicerol, cuyos grupos hidroxilo (–OH) se hallan esterificados con los radicales carboxílicos (–COOH) de los ácidos grasos, los cuales constituyen las largas patas. Desde los trabajos de Tietz y Shapiro, en 1956, se sabe que para sintetizar glicéridos a partir de ácidos grasos y glicerol, se requiere energía en forma de ATP (adenosintrifosfato). En realidad, tanto los ácidos grasos como el glicerol han de ser activados por procesos dependientes de ATP, para llegar a formar glicéridos. La activación de los ácidos grasos supone su transformación en derivados acilados del coenzima-A (acil-CoA) y la activación del glicerol, su fosforilación a α-glicerofosfato. En bioquímica se enseña que la formación de acil-CoA a partir de un ácido graso es catalizada por el enzima tioquinasa, también denominado acil-CoA sintetasa. Este enzima cataliza la unión de una molécula de coenzima-A por su grupo tiol al carboxilo de un ácido graso, con desprendimiento de agua. Esta reacción es endergónica, lo que significa que el producto de la misma (acil-CoA) es más rico en energía que sus sustratos (ácido graso y coenzima-A); por tanto, se requiere un aporte de energía exógena para poderse realizar. Esta energía es facilitada por el ATP, que en su hidrólisis pierde dos fosfatos en forma de pirofosfato, transformándose en AMP (adenosinmonofosfato).

La formación del otro sustrato de la síntesis de los glicéridos, el α-glicerofosfato, puede ser muy diversa. Las vías principales también se resumen en la biosíntesis de los triglicéridos. La más sencilla de todas es la fosforilación directa del glicerol por la acción de la gliceroquinasa. En esta reacción, el ATP es hidrolizado, liberando energía para que la reacción sea energéticamente posible, pero, al mismo tiempo, el fosfato formado queda esterificado con uno de los hidroxilos situados en posición α de la molécula del glicerol.

Otra forma de sintetizarse el α-glicerofosfato es a partir de glucosa. A través de la glucólisis, proceso de degradación de la glucosa, la glucosa forma fructosa 1,6 difosfato, que se transforma en gliceraldehído 3 fosfato y dihidroxiacetonafosfato; esta última se reduce a α-glicerofosfato por el enzima denominado dihidroxiacetonafosfato deshidrogenasa. En esta reacción, el grupo cetónico (–CO–) de la dihidroxiacetonafosfato es reducido, con la incorporación de dos átomos de hidrógeno (–CHOH–) procedentes de un nucleótido, el nicotinamín-adenindinucleótido reducido ($NADH + H^+$). También podemos formar

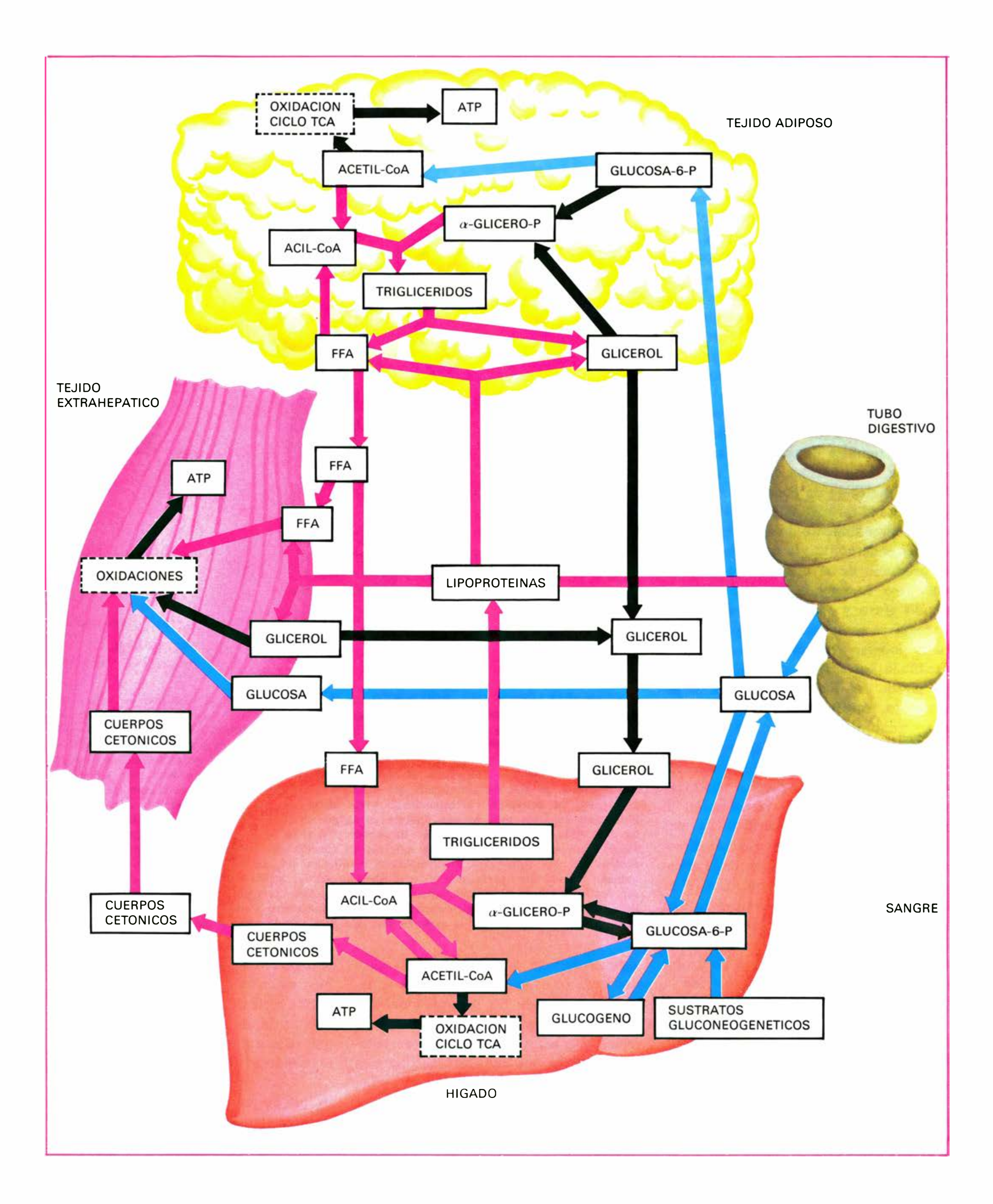


METABOLIZACION DEL PIRUVATO en el hígado y actividad lipolítica del tejido adiposo en la rata. A ratas alimentadas o en ayunas de 24 horas se les inyectó intravenosamente con piruvato radiactivo $C^{14}H^3$–CO–COO$^-$). A los 30 min se determinó la radiactividad en las grasas y en el glucógeno hepáticos y en la glucosa sanguínea, para conocer las actividades de lipogénesis y gluconeogénesis en los respectivos grupos. Los datos se expresan en cantidad de sustrato radiactivo convertida en los productos correspondientes. Puesto que, en la gluconeogénesis, la glucosa sintetizada del piruvato puede acumularse en el hígado en forma de glucógeno, la actividad correspondiente viene dada por la radiactividad que aparece en el glucógeno hepático más la que aparece en sangre en forma de glucosa. La actividad lipolítica del tejido adiposo se determinó incubando "in vitro" trozos de epidídimo graso de ratas, valorándose la producción neta de glicerol en función del tiempo, la cual depende de la hidrólisis de los glicéridos intracelulares, catalizada por la lipasa dependiente de las hormonas. Puesto que parte del glicerol liberado por el tejido al medio de incubación podría ser reutilizado por el mismo tejido, los datos se han corregido por este parámetro, al realizar las incubaciones en presencia del glicerol radiactivo y determinando, en consecuencia, la cantidad de glicerol que es captada por el tejido a cada uno de los tiempos de incubación.

α-glicerofosfato a partir de glucosa, a través de su oxidación directa por la denominada vía de las hexosas monofosfato. Por esta vía, la glucosa 6 fosfato se oxida a través de una serie de reacciones de las que el 6-fosfogluconato es un metabolito intermedio y en la que, por cada molécula de glucosa consumida, se pierde un átomo de carbono en forma de CO_2. De esta manera se llega a la síntesis del gliceraldehído 3 fosfato, que es transformado en dihidroxiacetonafosfato y, ésta, mediante la dihidroxiacetonafosfato deshidrogenasa, es reducida a α-glicerofosfato.

Ya vimos anteriormente que podemos sintetizar glicerol de glicéridos a partir del piruvato. De hecho, a partir del piruvato formado de los aminoácidos o de la oxidación del lactato, se puede también sintetizar α-glicerofosfato, mediante una serie de reacciones que llegan a la formación de gliceraldehído 3 fosfato, que pasa a dihidroxiacetonafosfato y ésta es reducida a α-glicerofosfato.

Aunque estas vías de formación de α-glicerofosfato para la síntesis de los glicéridos se presentan prácticamente en todos los tejidos estudiados, en 1957 Wieland y Suyter no encontraron gliceroquinasa (enzima que cataliza la síntesis de α-glicerofosfato a partir de glicerol) en el tejido adiposo. Por este motivo se venía admitiendo que, a diferencia de otros tejidos, el tejido adiposo carecía de la posibilidad de metabolizar directamente el glicerol. Esta imposibi-



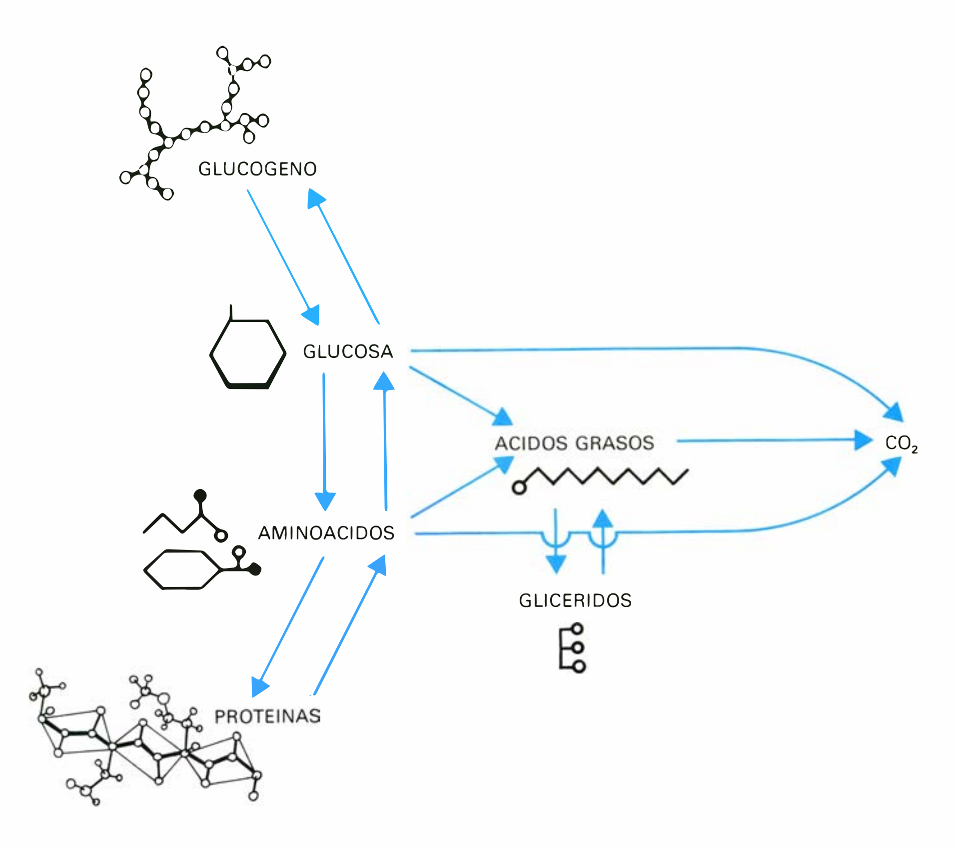
ESQUEMA GENERAL DE LAS INTERRELACIONES de carbohidratos y grasas en el organismo. Las líneas magenta corresponden al metabolismo lipídico y las azules al metabolismo de carbohidratos mientras que las negras corresponderían a vías metabólicas intermedias. La absorción de alimentos a través del tubo digestivo aporta los sustratos principales para las distintas vías metabólicas, las cuales terminan en el acúmulo de grasas en forma de triglicéridos en el tejido adiposo, en el de carbohidratos en el hígado en forma de glucógeno o en la oxidación total hasta CO_2 a través del ciclo de los ácidos tricarboxílicos (TCA o ciclo de Krebs, denominado así en honor de su descubridor). El que unas vías metabólicas funcionen más que otras depende de la asequibilidad de dichos sustratos, de las actividades de los enzimas que las catalizan, de la situación endocrina (variaciones en los niveles de hormonas en sangre), etc., pero los cambios siempre van dirigidos a mantener la homeostasis, eso es, lograr un medio interno constante. FFA son las iniciales, en inglés, de ácidos grasos libres.

lidad del tejido adiposo de incorporar moléculas de glicerol a glicéridos nos llamó la atención desde la primera vez que entramos en el estudio de la actividad metabólica del tejido adiposo, en 1966.

Nos parecía un contrasentido que, precisamente, el tejido que tiene mayor capacidad de acúmulo de grasas neutras en el organismo, no pudiera fosforilar directamente al glicerol para la esterificación de los ácidos grasos. Conviene tener en cuenta que más de un 90 por ciento de la masa celular del tejido adiposo está constituida por triglicéridos, siendo el tejido que mejor se ha adaptado para el acúmulo de energía metabólica en forma de grasas neutras. En la ilustración de la página 32 se muestra de forma esquemática el metabolismo del tejido adiposo, encuadrado dentro del esquema general de las interrelaciones carbohidratos y grasas del organismo. Si asumimos que el tejido adiposo carece de gliceroquinasa, su metabolismo puede desglosarse, tal como se indica en la ilustración de la página 34. Por un lado tanto los ácidos grasos como el glicerol de los glicéridos del tejido pueden proceder de la síntesis endógena de los mismos a partir de glucosa. Esta glucosa ha de ser captada de la sangre por el tejido adiposo, ya que éste no tiene capacidad de gluconeogénesis. Esta captación de la glucosa por el tejido adiposo es modulada por las hormonas, siendo la insulina la hormona que estimula con mayor eficacia dicha captación.

Por otro lado, los triglicéridos procedentes de la absorción intestinal y los sintetizados en el hígado circulan por la sangre acoplados con proteínas, fosfolípidos, colesterol y ésteres de colesterol, en forma de partículas denominadas lipoproteínas.

Cuando las llamadas lipoproteínas llegan a la membrana de las células del tejido adiposo (adipocitos), un enzima, la lipoproteína lipasa, hidroliza a los triglicéridos originándose ácidos grasos libres y glicerol. Los ácidos grasos libres pueden volver a la sangre. También pueden ser captados por el tejido para su activación a acil-CoA, siendo posteriormente esterificados con α-glicerofosfato, para acumularse en forma de triglicéridos. Al pensarse que no había gliceroquinasa en el tejido, el glicerol no podría ser metabolizado en el mismo tejido y tendría como única alternativa el ser transportado a través de la sangre a otros tejidos para su posterior metabolización.



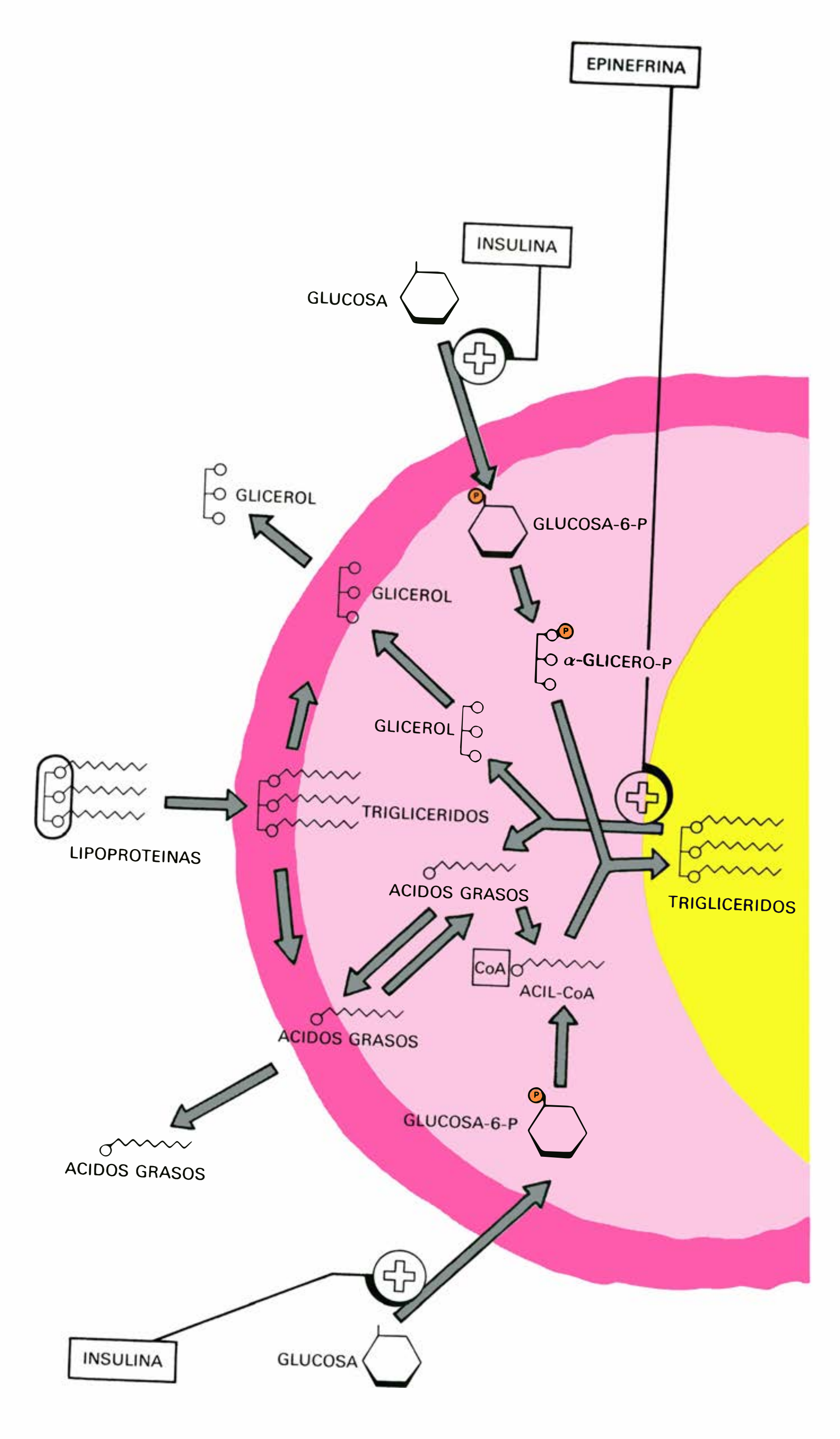
LA GLUCOSA Y LOS AMINOACIDOS pueden transformarse entre sí, y ser utilizados para la síntesis de los ácidos grasos, así como para su oxidación completa a CO_2, no ocurre así con los átomos de carbono de los ácidos grasos, que no pueden ser aprovechados para la síntesis de aquéllos; se acumulan en glicéridos o se degradan hasta resolverse en CO_2.

Igual suerte correría el glicerol derivado de la hidrólisis de los triglicéridos (lipólisis) acumulados dentro del tejido, la cual, como anteriormente se indicó, es catalizada por la lipasa dependiente de las hormonas.

En 1967, Robinson y Newsholme, usando un método radioquímico muy sensible, lograron demostrar la presencia de gliceroquinasa en el tejido adiposo, pero consideraron que su actividad era tan baja que resultaba insuficiente para fosforilar una cantidad apreciable de glicerol. Dichos autores concluyeron que, a pesar de la existencia de gliceroquinasa en el tejido adiposo, su capacidad para metabolizar el glicerol era prácticamente nula. Hemos incubado "in vitro" trozos y células aisladas de tejido adiposo de rata, en presencia de glicerol radiactivo, observando que, tanto los trozos de tejido como las células aisladas, incorporan la radiactividad de forma lineal en función del tiempo, en CO_2 y glicerol de glicéridos. Pensamos que, en presencia de glucosa, podríamos lograr, incluso, que parte de la radiactividad del glicerol pudiera ser utilizada para la síntesis de ácidos grasos, ya que la glucosa permite la formación de los coenzimas reducidos necesarios para la lipogénesis (el $NADPH + H^+$). De hecho, hallamos que, cuando la incubación se realizaba en presencia de glucosa, parte de la radiactividad también aparecía en la fracción de los ácidos grasos de los glicéridos. La proporción de glicerol radiactivo colocado en el medio de incubación que es metabolizada por el tejido llega a ser del orden del 40 por ciento a los 180 min de incubación. Conviene considerar que, durante el tiempo de la incubación, el glicerol radiactivo del medio ha sido diluido con el glicerol no radiactivo liberado por el tejido a través de la lipólisis, por lo que la cantidad neta de glicerol utilizado por los adipocitos es bastante apreciable.

Puesto que, para sintetizar CO_2, glicerol de glicéridos y ácidos grasos a partir de glicerol, la única vía posible que tiene el tejido es fosforilando previamente el glicerol por la acción de la gliceroquinasa, el esquema inicial del metabolismo del tejido adiposo debe cambiarse *(véase la ilustración de la página 35)*.

Así pues, aunque la fuente principal de glicerol de glicéridos y ácidos grasos es la glucosa, el tejido adiposo también puede sintetizarlos a partir de glicerol.



ANTECEDENTES DEL METABOLISMO del tejido adiposo. Hasta ahora se venía admitiendo que el tejido adiposo carecía de gliceroquinasa, es decir, del enzima capaz de fosforilar al glicerol. Por consiguiente, la síntesis de los triglicéridos se realizaría a partir de los ácidos grasos (los cuales se sintetizarían a partir de la glucosa), derivados de la lipólisis o hidrólisis de los triglicéridos endógenos o de los procedentes de la hidrólisis de las lipoproteínas que llegan a la membrana de los adipocitos a través de la sangre. En estas circunstancias, la fracción de glicerol de los glicéridos procedería exclusivamente del α-glicerofosfato sintetizado a partir de la glucosa. La epinefrina (también denominada adrenalina) es la hormona lipolítica por excelencia y su acción se realiza preferentemente activando a la lipasa dependiente de las hormonas. La insulina tiene efecto antilipolítico en tejido adiposo, pero actúa preferentemente facilitando la captación y metabolización de la glucosa en dicho tejido. Los signos más que aparecen aquí, corresponden a la activación.

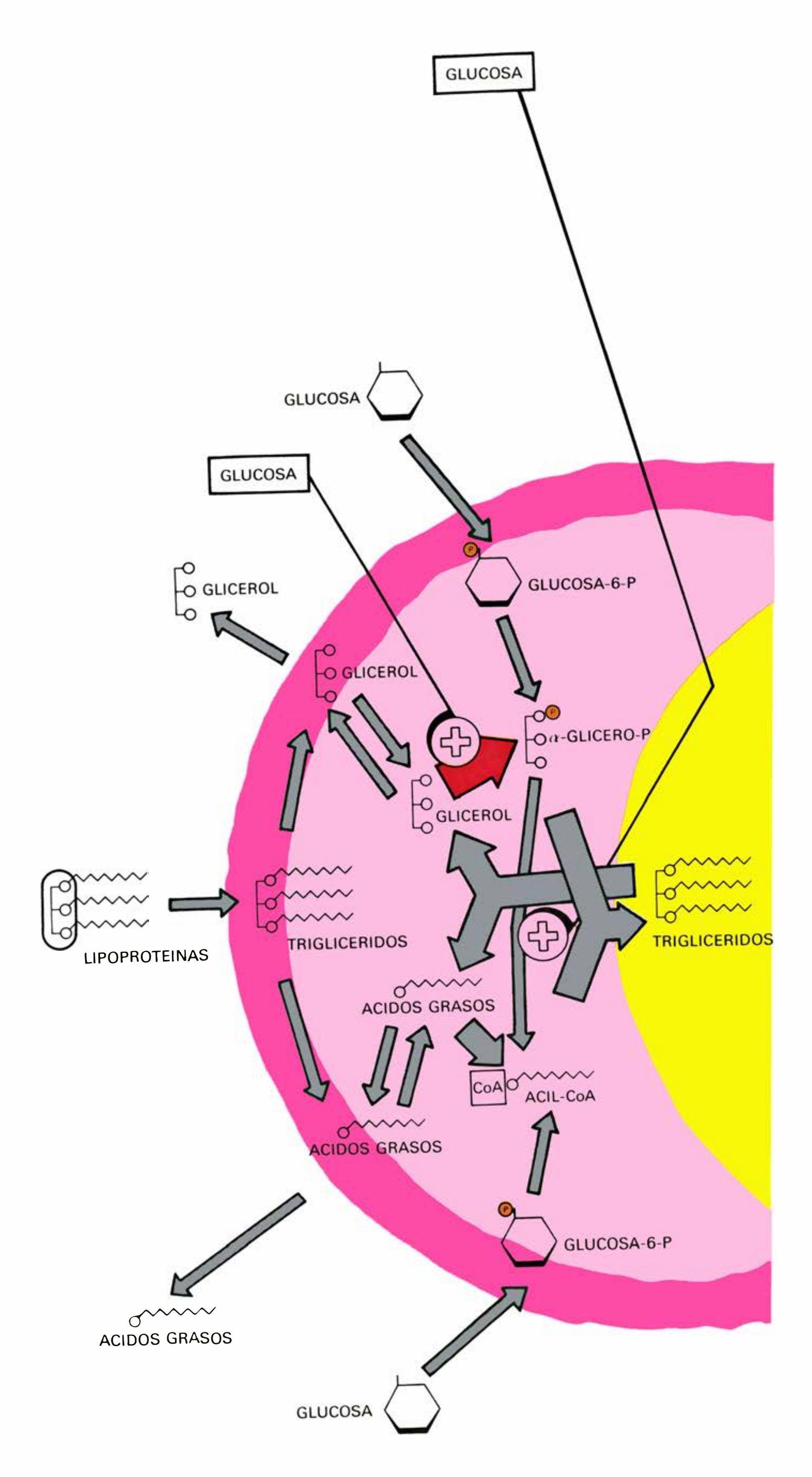
Con la finalidad de determinar de qué manera era modulado el metabolismo del glicerol en el tejido adiposo, realizamos una serie de experimentos "in vitro", con la colaboración de la Dra. Domínguez, en los que estudiamos los efectos comparativos de la glucosa, de los inhibidores metabólicos y los moduladores hormonales de la actividad lipolítica (adrenalina como hormona lipolítica e insulina como hormona antilipolítica) sobre la metabolización de la glucosa y el glicerol radiactivos.

Los resultados que hemos obtenido con este estudio nos permiten concluir que la metabolización del glicerol por el tejido adiposo es altamente dependiente de la asequibilidad de energía. Así, mientras que la glucosa estimula la metabolización del glicerol por el tejido, los inhibidores metabólicos del tipo de la 2-desoxiglucosa, que inhibe la capacidad del tejido para metabolizar la glucosa, y de la oligomicina, que actúa como desacoplador de la oxidación fosforilativa de la célula (hace que la célula desperdicie más energía de oxidación en forma de calor que en la síntesis de compuestos ricos en energía, como el ATP), inhiben intensamente la utilización de glicerol por el tejido. Como se representa esquemáticamente en la ilustración de la pág. 36, la insulina, amén de facilitar la captación y metabolización de la glucosa por el tejido adiposo, estimula directamente la metabolización del glicerol. Este efecto de la insulina facilitando la reutilización del glicerol dentro del adipocito, puede que contribuya al conocido efecto antilipolítico de dicha hormona, haciendo que disminuya la salida neta de glicerol y ácidos grasos del tejido a la sangre. De forma inversa a la insulina, la adrenalina (también conocida con el nombre de epinefrina), inhibe la metabolización del glicerol en el tejido adiposo *(véase la ilustración de la* pág. 37). La adrenalina estimula la formación de glicerol de glicéridos a partir de la glucosa y la lipólisis de los triglicéridos intracelulares. También, al inhibir la reutilización del glicerol dentro del adipocito puede que contribuya al efecto lipolítico de esta hormona, haciendo que aumente la salida neta de glicerol y ácidos grasos del tejido. Un cuadro metabólico similar ocurre cuando se estudia el tejido adiposo de animales en ayunas, en ausencia de hormonas en el medio de incubación, donde se presenta una intensa inhibición de la capacidad del tejido para metabolizar el glicerol. En estas condiciones, el glicerol sale a

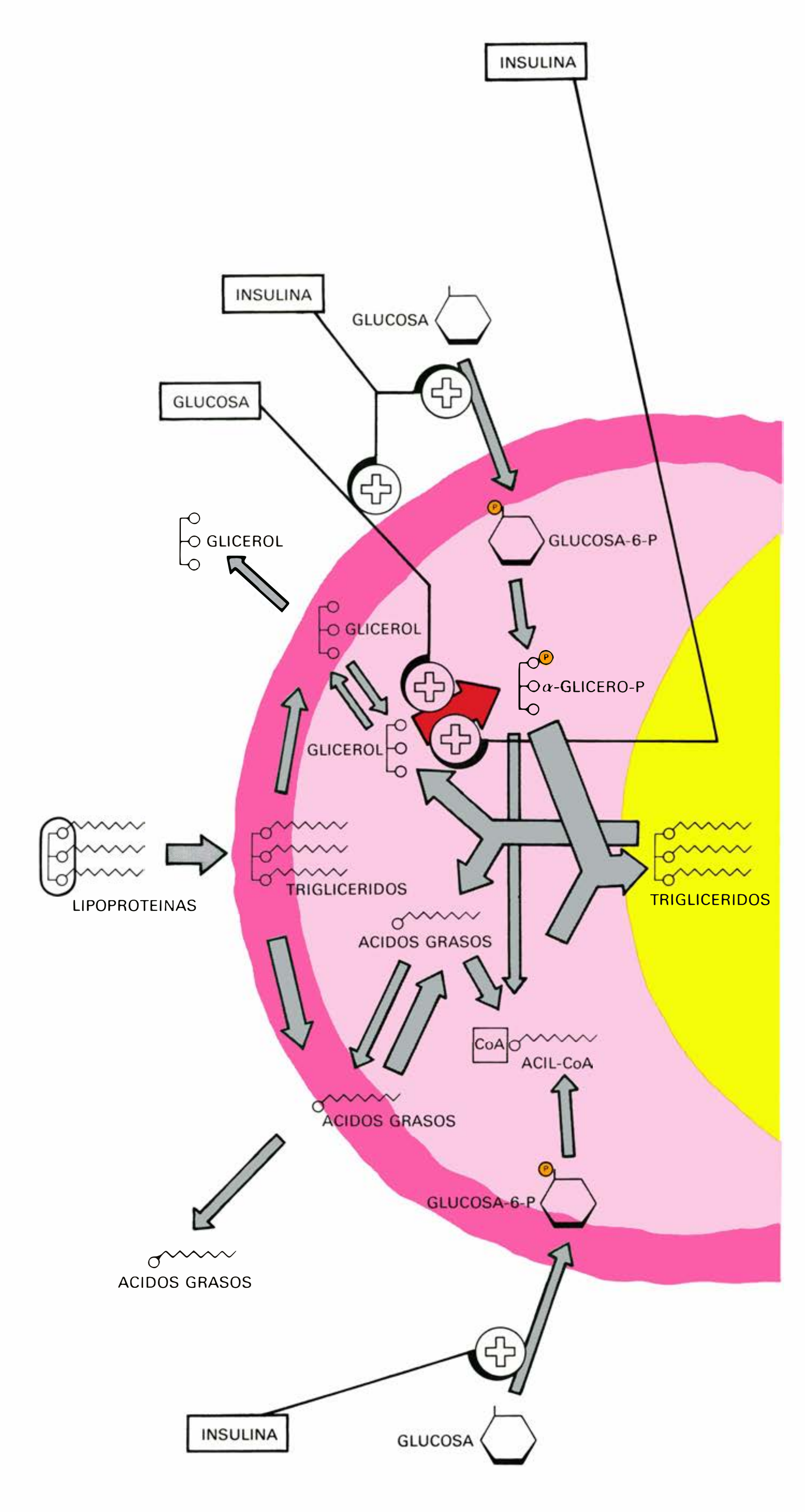
la sangre para ser utilizado por otros tejidos, preferentemente por el hígado para la síntesis de glucosa.

Con el propósito de estudiar las variaciones en la metabolización del glicerol por el tejido adiposo en distintas situaciones fisiológicas, en colaboración con el doctor Montoya y la señorita Seibel, hemos determinado la utilización de glicerol radiactivo por el tejido adiposo de ratas a las que se había extirpado quirúrgicamente el tiroides. Con este tratamiento conseguimos que los niveles de hormonas tiroideas en sangre sean bajos; es decir, se transforma a los animales en hipotiroideos. El hipotiroidismo viene generalmente asociado con un enlentecimiento metabólico, pero hay una tendencia al acúmulo de grasas, que se ha interpretado con el resultado de una inhibición en la movilización y metabolización de las grasas mayor que en su síntesis. Nosotros hemos encontrado que la actividad lipolítica del tejido adiposo de ratas, a las que se ha extirpado el tiroides, es prácticamente igual que la del de animales intactos, con niveles normales de hormonas tiroideas en sangre; sin embargo, la cantidad de glicerol que es capaz de metabolizar el tejido adiposo de las ratas hipotiroideas es más del doble que la de los animales normales. En conclusión, la tendencia de los animales hipotiroideos al acúmulo de las grasas puede que esté influenciada por esta mayor capacidad que tiene su tejido adiposo para reutilizar el glicerol intracelular.

Hasta ahora nos hemos referido a experimentos realizados "in vitro", cuyos resultados han de ser extrapolados al animal "in vivo" con cierta precaución. Los acontecimientos metabólicos en el animal "in vivo" no solamente están influidos por la capacidad neta de los tejidos para realizar determinadas vías metabólicas, sino por la cantidad de sustratos asequibles a las mismas por la presencia de reguladores de tipo endocrino o neuroendocrino, etc. En lo referente al metabolismo "in vivo" del glicerol por el tejido adiposo, hemos de reconocer que ha de estar influenciado por los bajos niveles de glicerol que normalmente hay en sangre. En nuestro intento de determinar el posible papel fisiológico que tiene la capacidad del tejido adiposo para metabolizar el glicerol, hemos realizado una serie de experimentos "in vivo", con la colaboración de dos doctorandos, los señores Carmaniú y Chaves. Hemos administrado intravenosamente y sin anestesia glicerol radiactivo a ratas, observando



EN CONTRA DE LO HASTA AHORA ADMITIDO, nuestros resultados demuestran que el tejido adiposo tiene capacidad para fosforilar una considerable cantidad de glicerol, a través de la reacción catalizada por la gliceroquinasa. Como consecuencia, el glicerol libre del tejido, formado de la hidrólisis endógena de los triglicéridos o de las lipoproteínas que llegan a la membrana del adipocito, puede ser metabolizado para la síntesis del glicerol de los glicéridos, la de los ácidos grasos, e incluso para su oxidación completa hasta CO_2. La glucosa estimula la metabolización del glicerol, posiblemente aportando, con su metabolismo, el ATP necesario para la fosforilación del glicerol y los coenzimas reducidos que son necesarios para lograr la síntesis de ácidos grasos (el $NADPH + H^+$).



EL EFECTO DE LA INSULINA sobre el metabolismo del glicerol en tejido adiposo se realiza principalmente en dos puntos concretos. Por un lado, facilitando directamente la utilización de glicerol por el tejido, estimulando la actividad de la gliceroquinasa que cataliza la fosforilación de este metabolito, y, por otro, estimulando la captación y metabolización de glucosa por el tejido. Puesto que la glucosa estimula la metabolización del glicerol, la insulina potencia sobre aquélla el efecto de esta hormona en la conversión del glicerol en α-glicerofosfato y su utilización como sustrato para la síntesis de ácidos grasos.

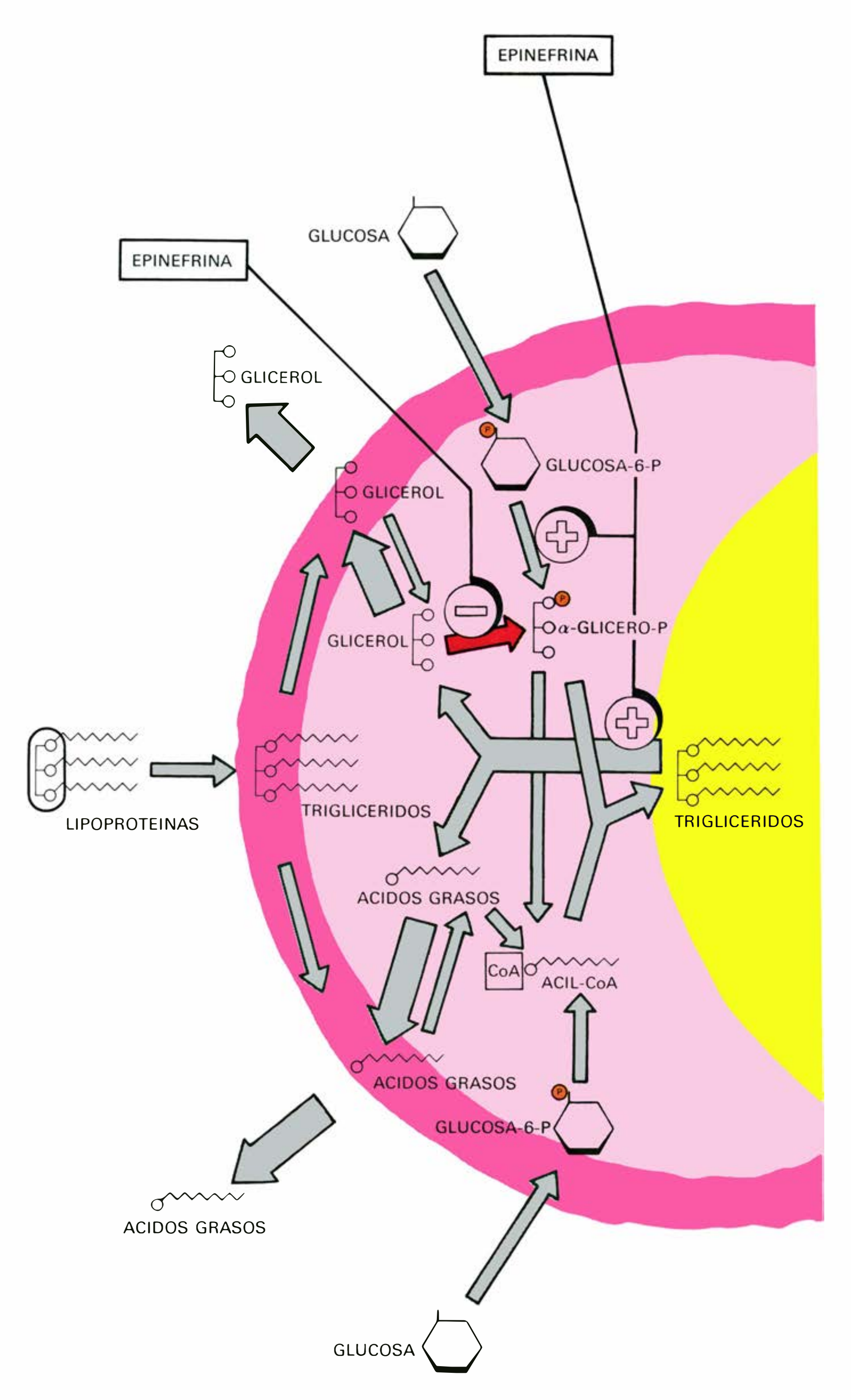
que muy pequeña proporción de dicho sustrato es incorporado al tejido adiposo. De hecho, en menos de 3 min de la inyección, prácticamente toda la radiactividad de la sangre aparece en forma de glucosa, lo que nos ha llevado a concluir que, en el paso a través del hígado del glicerol radiactivo administrado, la enorme capacidad gluconeogenética de dicho tejido ha impedido que haya gliceros asequible para ser metabolizado por el tejido adiposo. A pesar de estos resultados, pensamos que el papel fisiológico de la gliceroquinasa en tejido adiposo puede ser importante. Ya hemos visto cómo distintos factores hormonales pueden influir en la capacidad del tejido para metabolizar el glicerol. En 1963, Treble y Mayer demostraron ya que la actividad de gliceroquinasa en tejido adiposo era elevada en animales obesos, y, de hecho, se cree que algunos tipos de obesidad pueden derivarse de una alteración genética por la que el tejido adiposo tiene una capacidad, anormalmente alta, para metabolizar al glicerol y, en consecuencia, para acumular grasas.

En último lugar, es posible que "in vivo", el glicerol que metaboliza el tejido adiposo en situaciones fisiológicas no sea el procedente del glicerol libre de la sangre que, como indicábamos antes, normalmente se encuentra en baja concentración y es rápidamente transformado en glucosa por el hígado, sino el que se libera en el mismo adipocito en la hidrólisis de las lipoproteínas que llegan a su membrana, hidrólisis que se debe a la acción de la lipoproteína lipasa. En la Washington University Medical School, en Seattle, trabajé durante el verano de 1975 en colaboración con los Dres. Knopp y Montes, con los que logré marcar "in vivo" lipoproteínas de muy baja densidad, denominadas VLDL (very low density lipoproteins). Esto lo logramos administrando intravenosamente a ratas glicerol marcado con tritio (glicerol-H^3) y ácido palmítico marcado con C^{14}. Sacrificando los animales a distintos tiempos de la inyección, logramos un tiempo de marcaje óptimo para las VLDL: a los 20 min de la inyección obteníamos la mayor cantidad de radiactividad en las VLDL plasmáticas; en ellas, todo el H^3 se encontraba en forma de glicerol de glicéridos, mientras que todo el C^{14} aparecía formando parte de los ácidos grasos esterificados. Una vez premarcadas estas VLDL, y después de una purificación exhaustiva, las inyectamos intravenosamente a distintos grupos de ratas, que fueron sacrificadas a los 5, 15, 30, 60 o 120 min de la inyección.

Los resultados obtenidos demostraban que toda la VLDL administrada era rápidamente remetabolizada en el hígado; a los 15 min de la inyección, prácticamente toda la radiactividad había desaparecido de la sangre y se presentaba en el hígado. En el hígado, los glicéridos de las VLDL administradas eran hidrolizados, y mientras que los ácidos grasos derivados de esa hidrólisis eran reesterificados con α-glicerofosfato no radiactivo, para formar de nuevo triglicéridos que vuelven a la sangre en forma de lipoproteínas, el glicerol no volvía a ser convertido en componente lipídico, sino que era transformado en glucosa en el propio hígado, u oxidado totalmente hasta CO_2. En consecuencia, el glicerol de los glicéridos de las lipoproteínas circulantes que llegaban al tejido adiposo ya no era radiactivo, por lo que no había posibilidad de determinar si era metabolizado o no por dicho tejido.

En la actualidad, con la colaboración del señor Lasunción, un doctorando de nuestro Departamento, estamos intentando paliar la enorme capacidad del hígado para metabolizar el glicerol de los glicéridos de las lipoproteínas, con lipoproteínas del tipo VLDL, premarcadas "in vivo" en estudios "in vitro". Incubamos las VLDL radiactivas, en las que el glicerol de los glicéridos se encuentra marcado con C^{14}, en presencia de células aisladas del tejido adiposo de ratas. Realizamos el estudio con activadores e inhibidores de la lipoproteína lipasa, que es el enzima encargado de la hidrólisis de las lipoproteínas. Aunque todavía los resultados son provisionales y requieren una mayor confirmación experimental, nos demuestran que el tejido adiposo es efectivamente capaz de metabolizar una gran proporción del glicerol que se libera en las membranas de sus células como resultado de la hidrólisis de las lipoproteínas. Por los productos que se obtienen de dicha metabolización, podemos concluir que la misma se realiza a través de la fosforilación previa del glicerol, catalizada por la gliceroquinasa.

Aunque el estudio de la metabolización del glicerol de los glicéridos de las lipoproteínas por el tejido adiposo requiere el análisis de los factores endocrinos, alimentarios, etc., que puedan afectarla, es evidente que nos abre una nueva puerta en el conocimiento de los mecanismos de depósito de las grasas en el tejido adiposo. Un mejor conocimiento de este punto permitirá, a su vez, un mejor control clínico de la obesidad, las hipoproteinemias e hiperlipoproteinemias y demás disfunciones del metabolismo de las grasas en humanos.



EL EFECTO DE LA EPINEFRINA sobre el tejido adiposo se realiza en tres puntos principales. En primer lugar, la epinefrina es una hormona lipolítica, que estimula la actividad de la lipasa dependiente de las hormonas, facilitando la hidrólisis de los triglicéridos intracelulares. Este efecto no parece que se realice directamente, sino a través de la acción de esta hormona sobre el sistema de la adenilciclasa, estimulando la formación de AMP cíclico en el adipocito, el cual actúa a su vez estimulando la acción de la mencionada lipasa. En segundo lugar, hemos encontrado que la epinefrina inhibe la fosforilación y posterior metabolización de glicerol por el tejido adiposo, lo cual contribuye a que la producción neta de glicerol por el tejido se encuentre aún más aumentada de lo que estuviera si solamente dependiera de la actividad lipolítica del mismo. Por último, la epinefrina estimula la formación de glicerol de glicéridos a partir de la glucosa. Este efecto se realiza estimulando la metabolización de la glucosa hasta la síntesis de α-glicerofosfato. De esta forma, la epinefrina hace que la competencia de la glucosa y del glicerol para la síntesis del α-glicerofosfato, sea favorecida en beneficio de la glucosa. Puede que este efecto también contribuya a inhibir la capacidad de metabolización del glicerol por el tejido adiposo en presencia de epinefrina. El signo aquí reseñado significa inhibición de la reacción.

Ciencia y sociedad

Energía nuclear (4)

Los riesgos que presenta la utilización de la energía nuclear pueden agruparse en tres grandes rúbricas, que son: la radiación procedente de las instalaciones, la proliferación de las armas nucleares y el tratamiento de los desechos radiactivos.

El problema que más preocupa a nivel popular es, sin duda, el de la radiación proveniente de las centrales nucleares. Pueden imaginarse dos situaciones distintas. La primera sería la constituida por niveles de radiación muy pequeños pero mantenidos a lo largo de toda la vida de la planta, radiaciones que afectarían a los organismos situados en los alrededores y que podrían diseminarse por medio de la contaminación de las aguas o del aire. La segunda situación es la de un accidente que originase que cantidades apreciables de materiales radiactivos saliesen del reactor y se difundiesen por el medio. Respecto de la primera, hay que decir que las regulaciones establecidas con carácter internacional para los niveles de radiación provenientes de las centrales nucleares fijan límites de emisión extremadamente bajos, muy inferiores a las cantidades que cada uno de nosotros recibe de fuentes naturales, como los rayos cósmicos o la propia radiactividad de la tierra, y muy inferiores también a la dosis de radiación que se recibe por el simple hecho de ser sometido a un examen mediante rayos X. Por lo que al accidente se refiere, las normas de seguridad de las plantas nucleares son igualmente rigurosas y continuamente se están realizando perfeccionamientos en los sistemas de prevención y garantía contra cualquier riesgo accidental. A pesar de todo, es indudable que en una central nuclear podría producirse un accidente como en cualquier otro sitio. Sobre la probabilidad de tales accidentes y su diversa gravedad no pueden aducirse más que estimaciones teóricas, frente a los datos actuariales de que se dispone respecto de otros tipos de accidentes tales como los de carretera, fuegos, inundaciones, caídas, etc., ya que todavía no se ha producido ningún caso de accidente importante en ninguna de las centrales nucleares que desde hace varios años funcionan en el mundo. Una central nuclear no es una bomba y no puede explotar. Por otro lado, la probabilidad teórica de que en un reactor deje de funcionar el sistema de refrigeración y la temperatura se eleve tanto que se fundan todos los sucesivos recipientes que existen hasta que la radiación o los combustibles nucleares puedan llegar al exterior, con el fallo repetido de todos y cada uno de los diferentes sistemas de seguridad, es tan pequeña que se calcula que no es mayor de uno de tales accidentes por cada 10.000 años de operación de un conjunto de 100 reactores. Naturalmente, de producirse tal accidente originaría, aparte de unas cuantas muertes inmediatas, un número mucho mayor de defunciones por cáncer y por deformaciones genéticas que podrían llegar a las 5.000 personas en un período de 30 años. Por grave que esto sea, e indudablemente lo es, no conviene olvidar que el número de muertes que anualmente se producen en cualquier país por cánceres de diverso origen es muy superior a dicha cifra, por no mencionar causas de muerte tan gratuitas y devastadoras como son los accidentes automovilísticos.

No deja de ser curioso que las otras dos causas de preocupación que puede motivar la energía nuclear sean mucho menos populares que la acabada de comentar, a pesar de que sean también más serias y más difíciles de resolver satisfactoriamente. La primera se deriva del hecho de que la operación de las centrales nucleares requiere dominar una tecnología y origina unos subproductos que podrían permitir la fabricación de armas nucleares. Puede pensarse en robos de materiales radiactivos que pudiesen ser utilizados por organizaciones terroristas para amenazar a los estados e incluso para conseguir bombas nucleares rudimentarias (aunque esto no parece tan fácil como últimamente ha difundido la prensa sensacionalista). Las medidas que se toman para evitar tales sustracciones son severas y no parece probable que ésta deba ser una causa seria de alarma. En cambio, los países que disponen de centrales nucleares podrían desarrollar, mediante un gran esfuerzo nacional de medios, las condiciones necesarias para llegar a crear su propio armamento nuclear sobre la base del uranio y del plutonio de las centrales nucleares. Las salidas a esta situación no son fáciles. Por una parte, este riesgo no debería ser utilizado como argumento para privar a los países más necesitados de la energía de origen nuclear, de la que disfrutan los países más poderosos y más desarrollados técnicamente, o para mantener a los primeros en un perpetuo estado de dependencia técnica. Por otro lado, es indudable que la proliferación de las armas nucleares debe impedirse a toda costa si no se quiere aumentar desmesuradamente el riesgo de una apocalíptica guerra termonuclear. Los estados que poseen tecnología nuclear se debaten entre su deseo de exportarla y obtener rendimientos económicos de ella y el temor a su difusión y a la pérdida de la posición privilegiada de que actualmente disfrutan en el plano nuclear. Tratados internacionales, organizaciones de diverso tipo encargadas de controlar el comercio y la utilización de los materiales e instalaciones nucleares asegurando su uso para fines pacíficos, la influencia de los parlamentos y de los partidos políticos nacionales respecto de las actuaciones de sus gobiernos, etc., son las medidas parciales mediante las que en la actualidad se va manejando este aspecto del problema.

Por último, existe la grave dificultad de los desechos producidos por las centrales nucleares. El combustible que ya no puede ser utilizado en el reactor contiene cerca del 1 % de plutonio y una cantidad similar de uranio-235, junto con otros materiales radiactivos que lo hacen enormemente peligroso. Mientras muchos de estos materiales radiactivos se desintegran con bastante rapidez, el plutonio tiene un período de desintegración extremadamente largo, por lo que es necesario asegurar que estas cenizas radiactivas no puedan interferir con la biosfera durante un período de unos 250.000 años, para evitar las nocivas consecuencias que su radiactividad tendría sobre la vida del planeta. Afortunadamente, la cantidad de desechos de las centrales nucleares es relativamente pequeña, lo que permite que puedan encontrarse soluciones transitorias para su almacenamiento mientras se investiga y encuentra una más definitiva. En Estados Unidos y en Inglaterra existen plantas químicas que recuperan el plutonio y el uranio-235 de las cenizas para su posterior utilización como nuevo com-

bustible en los reactores, con lo que los residuos así purificados son mucho menos peligrosos. Estos residuos se comprimen luego en forma sólida y el método que parece más prometedor para hacerlos inofensivos consiste en encerrarlos en gruesos cilindros de vidrio que, a su vez, se introducen en cilindros de acero sellados y, por último, se entierran en lugares especialmente seleccionados para asegurar que no exista ningún riesgo de que, por corrosión o ruptura, su contenido pueda llegar a la superficie. Naturalmente, nunca quedará excluida por completo la posibilidad de un accidente, que además aumenta al crecer el número de pasos intermedios que deben sufrir estos productos, especialmente en lo que a su transporte se refiere. Como forma de control se está proponiendo actualmente que el número de plantas destinadas al tratamiento de los combustibles nucleares usados sea muy reducido a nivel mundial y que se encuentren bajo el control de organismos internacionales para garantizar contra todo posible riesgo de utilización de la energía nuclear para fines no pacíficos. Indudablemente, el problema más serio que plantea la tecnología nuclear de la fisión es éste: el de los desechos radiactivos.

Interferón versus hepatitis

Desde que en 1957 se descubrió el interferón, que es una proteína inducida en las células animales por un virus y la cual protege luego a otras células contra el virus inductor y otros tipos de virus, subsistió la esperanza de que la substancia tendría la misma eficacia clínica antivírica que, antibacteriana, los antibióticos. Ha costado mucho confirmar esa esperanza. El interferón ha resultado ser una proteína compleja que se manifiesta en formas muy distintas y posee múltiples efectos que mueven a confusión. Su producción celular puede estimularse en células aisladas o en todo el animal, incluyendo al hombre, recurriendo a varios agentes, además de los virus. Sin embargo, la administración de un agente inductor en pacientes humanos con la pretensión de que su organismo produzca cantidades eficaces de interferón endógeno no se ha visto acompañada, por ahora, del éxito. Con mucha más suerte se puede preparar el interferón exógeno mediante la estimulación de los leucocitos de la sangre humana con virus Sendai. Este interferón es muy caro, razón por la cual, aunque administrado en grandes dosis haya producido algún efecto en los virus del resfriado, no resulta un agente práctico para una profilaxis contra el resfriado común. En recientes ensayos, se ha experimentado la acción del interferón contra enfermedades víricas más serias.

Un equipo de doctores de la Escuela de Medicina de la Universidad de Stanford acaba de informar de que el tratamiento con interferón parece surtir efecto en una infección crónica seria asociada a serohepatitis aguda, o hepatitis B. Un 10 por ciento, aproximadamente, de los pacientes hospitalizados en los Estados Unidos con hepatitis B acaban por ser crónicos; pueden sufrir repetidos episodios de hepatitis activa, asociada a lesión hepática, y actúan de portadores que pueden infectar a otras personas con hepatitis vehiculada por una transfusión sanguínea u otros medios todavía no bien definidos. La infección crónica se caracteriza por la presencia continua en sangre del antígeno de superficie de la hepatitis B. y, algunas veces, por indicadores que revelan la presencia de partículas Dane; de éstas se sospecha que son partículas del virus de la hepatitis. Entre los indicadores se encuentran un antígeno del núcleo de la partícula, una forma específica del enzima ADN polimerasa y un ADN circular de doble hélice específico.

Los investigadores de la Universidad de Stanford, que anunciaron sus resultados en *The New England Journal of Medicine,* fueron Harry B. Greenberg, Richard B. Pollard, Larry L. Lutwick, Peter B. Gregory, William S. Robinson y Thomas C. Merigan. Tuvieron a su cuidado cuatro pacientes de hepatitis crónica, tres de los cuales poseían niveles elevados de polimerasa de la partícula Dane. Se les aplicó unos cortos tratamientos con grandes dosis de interferón de células sanguíneas humanas, con lo que se logró reducciones transitorias en los niveles en sangre de la polimerasa de la partícula Dane y de otros indicadores. Un tratamiento prolongado con dosis menores reducía significativamente los niveles en sangre; los niveles bajos persistían durante algunas semanas después de terminado el tratamiento. Los investigadores de la Universidad de Stanford dedujeron que el interferón, "al parecer, desarrolla un efecto represivo en la producción de las partículas Dane", es decir, parece inteferir la multiplicación de las partículas putativamente víricas". A raíz de lo cual, confían poder realizar un ensayo clínico que habrá de valorar el efecto producido por el interferón en la enfermedad hepática causada por infección de hepatitis B crónica; asimismo, esperan poner en claro si puede mejorar realmente el funcionamiento del hígado.

La gran transición

Los estudiosos de la población humana entienden por "transición demográfica" el proceso mediante el cual la población mundial llega a alcanzar una situación de estabilidad. En una transición de este tipo, la sociedad en cuestión pasa de una etapa de elevada tasa de natalidad y mortalidad a otra cuya tasa de ambos conceptos es resueltamente baja. De ordinario, el descenso en la tasa de natalidad sigue al descenso en la tasa de mortalidad, a un intervalo de varias generaciones. En ese interregno aumenta la población. La prueba de que nos encontramos en una situación de transición viene ofrecida por el informe *World Population: 1975,* publicado por la oficina del censo del U. S. Department of Commerce, que se basó en los datos recogidos por el International Statistical Programs Center de dicha oficina.

De acuerdo con el informe, desde 1950 "las tasas de mortalidad han decrecido con mayor rapidez que las tasas de natalidad en las zonas menos desarrolladas", de lo cual se infiere que la tasa media de crecimiento poblacional pasó de ser el 1,8 por ciento, en el lustro 1950-1955, al 2,2 por ciento durante el quinquenio 1970-1975.

De todas las zonas, América Latina registró la tasa de crecimiento más elevada, que, para esos 25 años estudiados, consiguió una media de crecimiento del 2,8 por ciento anual. Si exceptuamos los países de la América meridional templada (Argentina, Chile, Uruguay y las Malvinas), considerados por las Naciones Unidas como un conjunto regional más desarrollado, la población sudamericana rebasó su duplicación pasando de 139 millones en 1950 a 283 millones en 1975.

Dos países importantes han logrado estabilizar su población: Austria, con una tasa de crecimiento cero y Bélgica, cuya tasa media es del 0,3 por ciento. Estados Unidos registra una tasa de natalidad nula del 15 por mil, una tasa de mortalidad del 9 por mil y un índice de crecimiento del 0,8 por ciento anual. Las dos Alemanias se encuentran en la situación infrecuente de registrar una tasa de natalidad inferior a la tasa de mortalidad; la tasa de natalidad es del 11 por mil en Alemania Oriental y del 10 por mil en Alemania Occidental; la tasa de mortalidad es, respectivamente, del 14 y del 12 por mil.

Los procesos repetitivos en el desarrollo del niño

El niño, al ir creciendo, adquiere ciertas habilidades, las pierde y las vuelve a recuperar. ¿Cómo acomodar este fenómeno a la idea de que su modo de comportamiento evoluciona, más o menos, a la par que su cuerpo

T. G. R. Bower

Durante muchos años, los especialistas en el estudio del desarrollo infantil han venido dirigiendo sus investigaciones y formulando sus teorías a partir de una hipótesis principal: así como el organismo del niño crece progresivamente, también mejora progresivamente en toda clase de tareas –perceptivas, intelectuales o motoras– a las que se aplique. Esta hipótesis constituye el fundamento de todos los tests de inteligencia, los cuales se confeccionan según la idea de que un niño normal de nueve años puede hacer lo mismo que otro de ocho años y medio, más algo más; y un niño normal de ocho años y medio puede hacer lo mismo que el niño normal de siete años, más algo más, y así sucesivamente.

La hipótesis del desarrollo progresivo parece absolutamente sentada. Después de todo, si se observa a un mismo niño en distintas etapas de su desarrollo, cada vez se le ve mayor. Si bien el crecimiento no es un proceso continuo y regular, nunca ocurre que un niño que mide 1,20 m en un cierto momento se encoja y mida 1,05 m al apo siguiente. Así como no se observa nunca una regresión de este tipo en el desarrollo físico, difícilmente podríamos pensar que pudiera darse una regresión análoga en el desarrollo del comportamiento o de la inteligencia. ¿O tal vez sí?

Numerosas investigaciones, especialmente algunas realizadas en los últimos años, parecen indicar que el desarrollo del comportamiento y el desarrollo intelectual pueden no ser rigurosamente acumulativos y aumentativos. Tales estudios apuntan la posibilidad de que el crecimiento psicológico siga un modelo completamente distinto del modelo del desarrollo físico. Un ejemplo fácil de observar es el del desarrollo del movimiento, en particular, del caminar. Si se le sujeta adecuadamente, un recién nacido puede andar sobre una superficie plana, lo cual demuestra su notable coordinación sensomotora. Esta habilidad, no obstante, desaparece hacia las ocho semanas de vida y, normalmente, no vuelve a presentarse en forma alguna hasta el final del primer año.

En un nivel algo más complejo, durante las primeras semanas de vida los niños pueden extender su brazo para tocar objetos visibles y, en ocasiones, llegan incluso a agarrarlos. Esta coordinación ojo-mano desaparece también alrededor de las cuatro semanas, y no vuelve a manifestarse hasta que cumple las veinte semanas, aproximadamente. Asimismo, los bebés muestran una apreciable coordinación oído-mano. Se muestran capaces de extender el brazo y de asir objetos que pueden oír pero no ver, sean ciegos o posean una visión normal. Esta capacidad, cuya utilidad es obvia, sobre todo en el caso de niños ciegos, desaparece cuando el niño cumple los cinco o seis meses; en el caso de los niños ciegos puede desaparecer para siempre.

En el área de la coordinación sensomotora, pero a un nivel de complejidad todavía superior, hemos de incluir el hecho de que los recién nacidos muestran una extraordinaria capacidad para imitar el comportamiento del adulto. Por ejemplo, repiten cabalmente los gestos de un adulto que les saque la lengua, abra la boca o enarque las cejas. Tal capacidad es, de todas las conocidas, la que mejor demuestra la potencia del sistema perceptivo del recién nacido. Examinemos qué supone el hecho de imitar a alguien que le está sacando la lengua. El niño debe identificar lo que ve en la boca del adulto como la lengua (le pediría al lector que me disculpara por no especificar si es "él" o "ella" quien ve, lo cual haría harto pesadas este tipo de exposiciones); debe comprender que la cosa que no puede ver pero sí puede sentir en su propia boca es la lengua, lo homólogo a esa cosa que ve; finalmente, debe ejecutar a la perfección unos complejos movimientos musculares a fin de conseguir imitar lo que ve. La actividad imitativa parece ser fundamentalmente una habilidad social. El niño y su madre establecen una relación íntima a medida que van desarrollando juegos de imitación. Pese a manifestarse tan tempranamente, da la sensación de que esta capacidad se desvanece pronto y sólo vuelve a observarse hacia el final del primer año.

La aparente pérdida de ciertas capacidades no se reduce al campo de la actividad sensomotora; tampoco se reduce al período de la primera infancia. El modelo de pérdida y readquisición de una capacidad se extiende a las habilidades intelectuales abstractas, y persiste a lo largo de toda la infancia. Los adultos, por ejemplo, saben perfectamente bien que el peso de una masa de arcilla para modelar no varía con la forma; pues bien, este hecho debe descubrirlo el niño, no una, sino tres veces, a lo largo de su desarrollo.

Si a un niño de un año se le da una bola de arcilla es muy probable que se forme una idea equivocada de su peso al sostenerla por vez primera. Sin embargo, después de haberla tenido dos o tres veces en sus manos, su comportamiento mostrará claramente que ya sabe cuánto pesa el objeto. Lo coge sin balancear el brazo, y es capaz de colocarlo

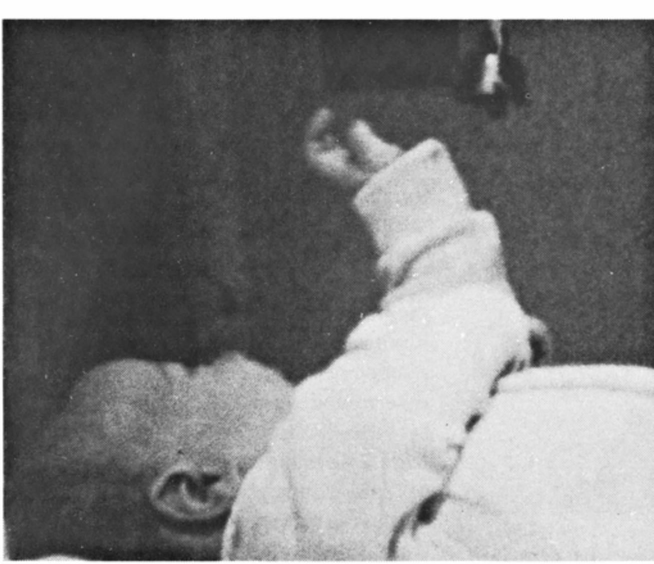
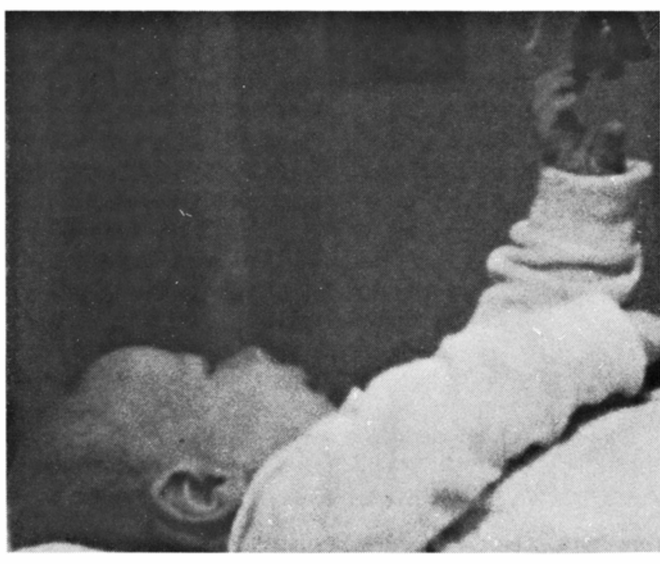
exactamente en el lugar que desea. Supongamos que, ahora, ante la mirada del niño, damos a la bola una forma de salchicha. ¿Qué sucede cuando toma la salchicha en sus manos? Es característico que su brazo se eleve sobre su cabeza, dando a entender que imagina que el objeto, al alargarse, se ha hecho mucho más pesado. Cae en el error opuesto si el investigador comienza por mostrarle un trozo de arcilla en forma de salchicha y luego le da la forma de bola. En resumen, el niño de un año no domina el concepto de la conservación del peso.

Si hacemos la prueba con el mismo niño al cumplir los 18 meses, ya no comete error alguno. Si tomamos su comportamiento como índice de sus conocimientos, podemos deducir que el niño de 18 meses sabe que el peso de un objeto no varía al variar de forma. O sea, que, a los 18 meses, ha captado ya la idea de la conservación del peso.

Si a ese mismo niño se le pregunta dos años después qué sucede con el peso de una bola de arcilla al convertirla en una salchicha, con toda probabilidad responderá que la salchicha pesará más porque es más larga. Más aún, si se somete al niño al mismo test de comportamiento al que se le sometió cuando era un bebé, cometerá otra vez los errores que cometió a la edad de 1 año, errores que no cometió a los 18 meses. Una vez más, si tomamos el comportamiento como un índice de sus conocimientos, parece como si hubiera vuelto a perder la idea de la conservación del peso.

Normalmente, el niño recupera esa noción; y lo demuestra tanto verbalmente como a través de su comportamiento hacia los siete u ocho años. No obstante, tal adquisición no es todavía completa en esta etapa. Si se le somete de nuevo al test hacia los 11 o 12 años, dará una respuesta verbal errónea, como hizo a los cuatro años. Ahora bien, no sabemos si en el test de comportamiento mostrará idéntico retroceso porque todavía no se ha experimentado. Parece correcto suponer, sin embargo, que debería retroceder, ya que el lenguaje suele preceder a al comportamiento. El niño no posee una idea fija de la conservación del peso hasta la edad de 13 o 14 años. Observaciones como las que acabo de describir parecen estar en contradicción con la opinión de que el desarrollo psicológico es un proceso aumentativo y continuo al igual que el desarrollo físico. Parece ser que las habilidades o capacidades aparecen y luego desaparecen, dejando al niño en una situación peor que en la que

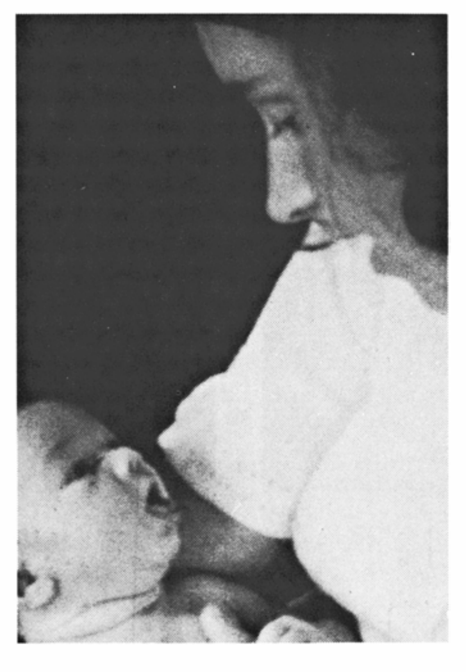


UN NIÑO DE DIEZ DIAS EXTIENDE LA MANO y toca una campana sin vacilar, demostrando así la notable organización del sistema perceptivo del recién nacido y su alto grado de coordinación ojo-mano. Al cumplir el niño las cuatro semanas, esta capacidad desaparece y no vuelve a aparecer hasta cuatro meses más tarde. Estas fotografías, que deben mirarse de izquierda a derecha y de arriba abajo, son una secuencia de fotogramas de una película que le fue tomada al niño en el mismo laboratorio del autor en la Universidad de Edimburgo.



UNA NIÑA DE SEIS DIAS ANDA, exactamente igual que un niño mayor, si se la sujeta adecuadamente sobre una superficie plana. Esta asombrosa habilidad sensomotora desaparece hacia las ocho semanas y no vuelve a manifestarse hasta el final del primer año de vida.



UNA NIÑA DE SEIS DIAS IMITA a su madre que saca la lengua. La capacidad de imitar es una proeza mucho más compleja que la de alcanzar algo con la mano o la de andar. Exige que la niña se dé cuenta de que lo que ve en la boca de su madre es una lengua *(izquierda)*, y que lo que siente, pero no puede ver, en su propia boca es también una lengua. Después, debe ejecutar las complejas acciones musculares necesarias para sacar su lengua *(derecha)*. Se supone que la capacidad de imitar también desaparece y reaparece hacia el año.

estaba cuando era más pequeño y tal vez incluso no mejor que cuando era un bebé.

Hay pruebas, no obstante, de que las distintas fases del desarrollo están conectadas. Se ha comprobado, por ejemplo, que si a un bebé se le enseña a andar en una fase muy temprana de su desarrollo, esta experiencia acelerará la aparición de la capacidad de andar más adelante. Se ha avanzado la suposición de que la adquisición de ciertos conceptos en la infancia es necesaria para la presencia permanente posterior de esos conceptos, y que un niño que no adquiere conceptos corrientes durante su infancia puede quedar incapacitado para adquirirlos durante toda su vida. Existen datos que permiten apoyar esta hipótesis. Habría que deducir, pues, que el estudio de los procesos repetitivos a lo largo del desarrollo tienen un valor práctico. Las observaciones, sin embargo, complican este rompecabezas teórico. ¿Cómo puede ocurrir que algo que desaparece sea decisivo para el subsecuente desarrollo?

Yo mismo me he visto sorprendido por algunos procesos repetitivos a lo largo del desarrollo, durante varios años. Cuando empecé a estudiarlos, partí de la base ingenua de que una repetición es una repetición, y, estudiando cualquier tipo concreto, ya fuera sensomotora o cognoscitiva, al final obtendría una teoría general sobre las repeticiones en el desarrollo. Así pues, me concentré en el proceso repetitivo más simple y más rápido: extender el brazo para alcanzar algo.

Hay dos cuestiones obvias en el estudio de todo proceso repetitivo. Primera, ¿qué es lo que hace que la primera fase en el dominio de una determinada habilidad –llamémosle Fase 1– se interrumpa? segunda, ¿cuál es la relación existente entre la Fase 1 y la Fase 2, o cualquier otra fase posterior? Basándonos en los métodos de investigación conocidos, es difícil establecer, realmente que exista una relación entre dos fases del comportamiento separadas por un gran intervalo a lo largo del desarrollo. El único paradigma de algún valor al respecto es la hipótesis de la práctica precoz: si se puede demostrar que practicando un determinado tipo de conducta durante la Fase 1 ello afecta la aparición en la Fase 2 de esa misma conducta, habremos obtenido un argumento en favor de que ambas fases están relacionadas. No se trata de una hipótesis definitiva, que nos dé una total seguridad, pero no deja de ser una hipótesis.

Así pues, tomé varios grupos de bebés y los sometí a una práctica intensiva del

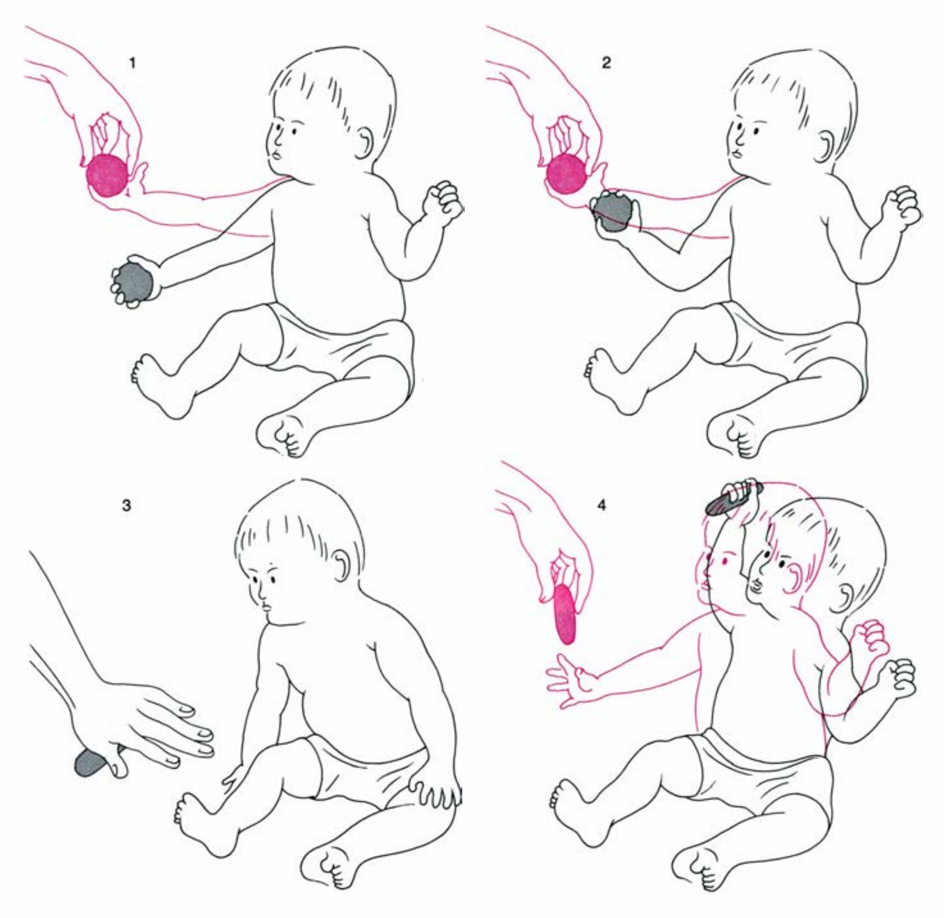
acto de extender el brazo para alcanzar un objeto durante la Fase 1, o sea, durante las cuatro primeras semanas de vida. Los resultados fueron moderadamente claros y se ajustaron a la conclusión a la que habían llegado anteriores investigadores en el campo del movimiento de los pies: cuanto más se practica un tipo de comportamiento en la Fase 1, antes aparece en la Fase 2. En mi investigación se dieron incluso casos en los que la capacidad para extender el brazo no se perdió después de la Fase 1.

Semejantes resultados apuntaban la posibilidad de que la razón de que desaparecieran las habilidades radicaba en la falta de práctica. Potenciando ésta, supuse, no tendrían por qué desaparecer. Si no lo hacían, se confirmaría así la teoría tradicional de que el desarrollo psicológico es un proceso continuo y acumulativo, lo mismo que el desarrollo físico.

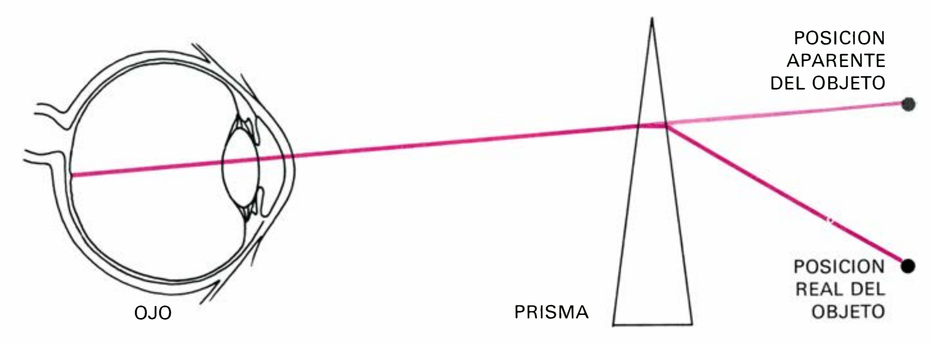
Para tratar de comprobar esta hipótesis, mis colegas de la Universidad de Edimburgo y yo adjudicamos una selección de tareas distintas a un grupo de bebés de sólo días o semanas y les sometimos a una práctica intensiva, haciéndoles realizar cada tarea tan pronto como se manifestaba la correspondiente capacidad. Los resultados fueron de lo más dispar, por decir lo menos. Por ejemplo, la práctica en la coordinación oído-mano en la Fase 1 aceleró la desaparición de esta coordinación y retrasó su aparición en la Fase 2. Este hecho se dio tanto en niños normales en la obscuridad como en un niño ciego. Respecto a tareas más cognoscitivas, los resultados no fueron coherentes. Algunas veces, la práctica durante la fase precoz de una capacidad adelantó su reaparición, pero el incremento en dicha práctica no se evidenció como directamente proporcional al respectivo adelanto.

Veamos un ejemplo. Una de las tareas que presentamos a los niños fue un problema de cálculo que implicaba una forma de conservación. Se le mostraba al niño un par de tiras de caramelos de distinta longitud, con distinto número de caramelos y con la distancia entre dos caramelos también distinta. Luego se le permitió que escogiera la hilera que deseara. Si siempre hubiera escogido la tira con más caramelos se hubiera llegado a la conclusión de que tenía una capacidad primitiva para contar. Una elevada proporción de niños (en edades comprendidas entre los dos y los dos años y medio) pudieron dar una respuesta verbal correcta. Después de esa edad se mostraron incapaces de responder correctamente hasta alrededor de los cinco años. Incluso antes de los dos años hay una etapa en la que los niños pueden responder correctamente a ese tipo de tareas (pese a no poder contestar oralmente). Fue esta etapa inicial la que investigamos. Con la práctica, las respuestas de los niños llegaron a ser totalmente correctas. Más adelante, sin embargo, a la edad de dos o dos años y medio, cuando los demás niños son capaces de dar respuestas verbales correctas, sólo una pequeña proporción de esos niños con práctica precoz pudo darla. No obstante, la proporción de niños que, por último adquirieron la capacidad de dar respuestas verbales correctas a los cinco años pareció no resultar afectada.

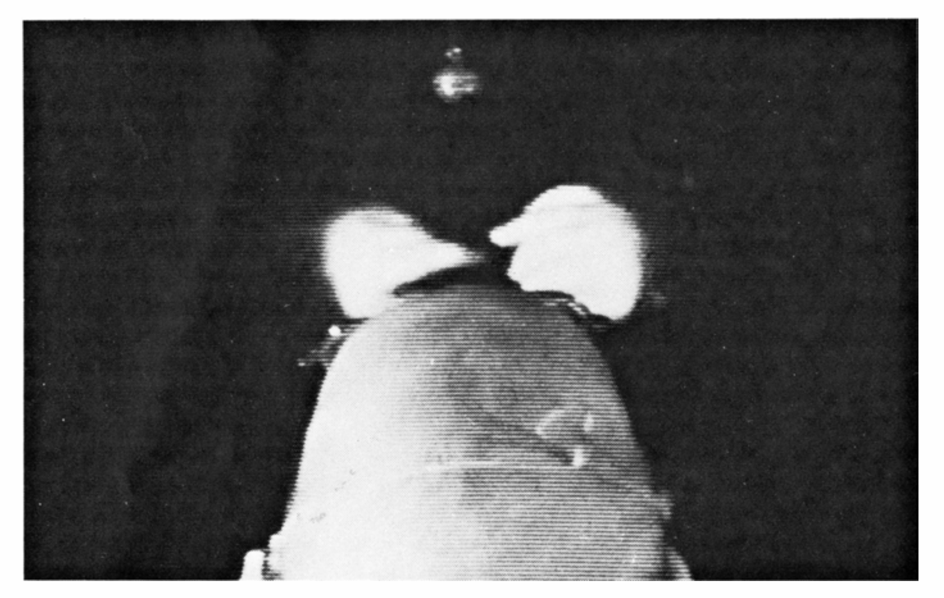
Contrariados por el hecho de que nuestra primera explicación de los fenómenos repetitivos en el desarrollo hubiera fallado, decidimos volver a nuestra anterior indagación sobre la capacidad de tender la mano para alcanzar un obje-

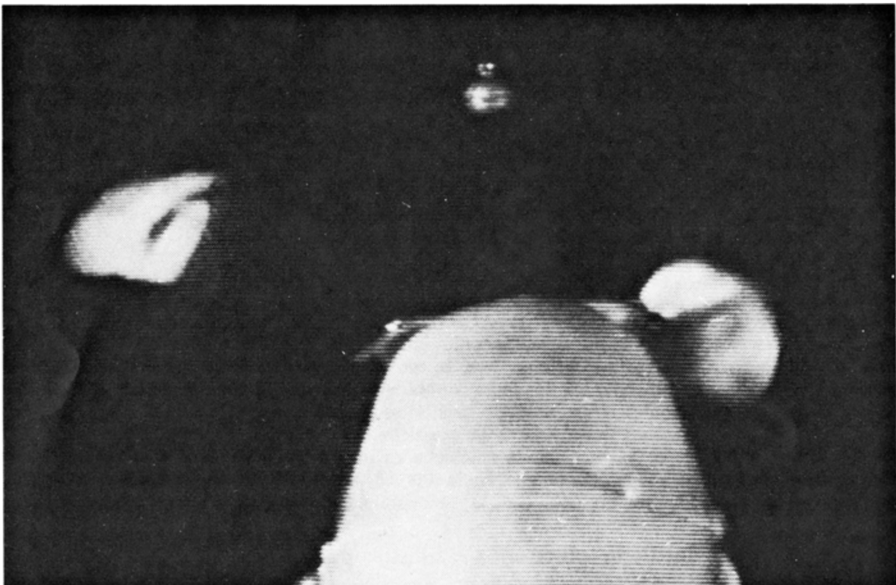


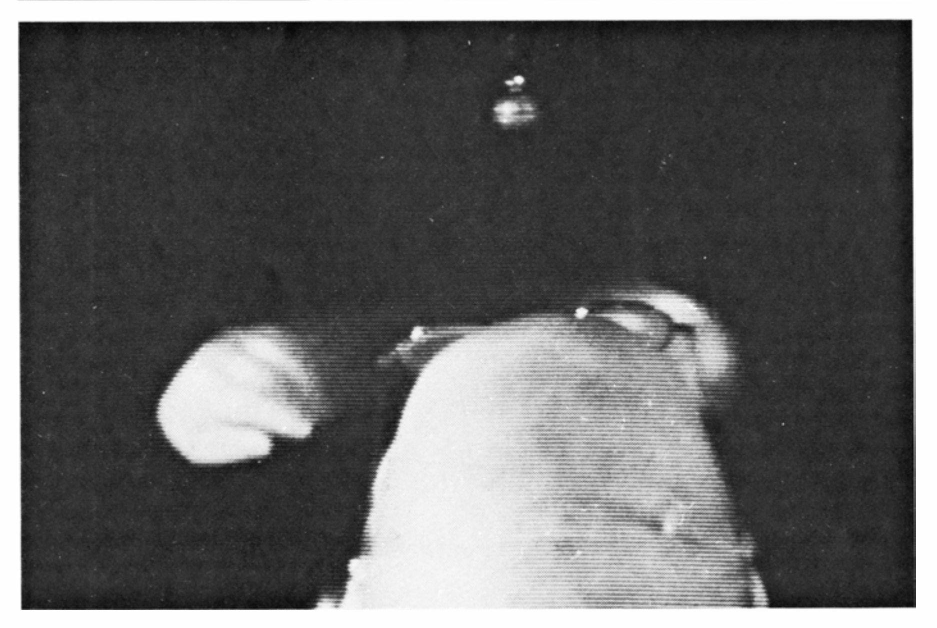
EL CONCEPTO DE LA CONSERVACION DEL PESO puede adquirirse, no una, sino hasta tres veces a lo largo del desarrollo infantil. Si un niño de un año sostiene una bola de arcilla para modelar por primera vez, lo más frecuente es que juzgue erróneamente su peso *(1)*. Pronto, sin embargo, su conducta revela que ha aprendido a calcular el peso del objeto antes de agarrarlo *(2)*. La bola de arcilla se convierte luego en una salchicha a la vista del niño *(3)*. Cuando el niño agarra la salchicha, casi siempre sus brazos se elevan *(4)*. lo que indica que el niño piensa que la salchicha es más pesada que la bola porque es más larga. Esta conducta errónea desaparece hacia los 18 meses, reaparece y vuelve a desaparecer dos veces más. El niño no adquiere un concepto estable del peso hasta los 13-15 años.



UN PRISMA TRIANGULAR colocado en unas lentes desplaza la localización aparente de un objeto de su localización real. El efecto causado por la colocación de unas gafas con prismas triangulares al niño puede observarse en las dos páginas siguientes.







UN NIÑO PEQUEÑO PROVISTO DE PRISMAS TRIANGULARES tiende la mano hacia el lugar en que ve que está un objeto, y se equivoca. Después de un rato en que su mano y el objeto están en su campo visual, tiende de nuevo la mano y también se equivoca. Parece incapaz de utilizar su visión para corregir la posición de su mano. Las líneas horizontales que muestra la fotografía son líneas de registro de la cámara de televisión.

to, y examinar de nuevo las características de esta capacidad en la Fase 1 con respecto a las que presentaba en la Fase 2. Descubrimos que los niños que habían practicado en la Fase 1 desarrollaban mejor cuando reaparecía esta capacidad en la Fase 2, que los que no habían practicado. En particular, había más niños capacitados para agarrar objetos colgantes en distintas posiciones entre los niños con práctica, y se mostraron también sumamente hábiles para alcanzarlos en condiciones de distracción visual.

En otro experimento, colocamos a los niños unas lentes especiales constituidas por dos prismas triangulares transparentes y delgados, en vez de cristales. Los prismas desplazan la situación aparente de un objeto con respecto a su situación real. Los niños normales, que no hayan hecho prácticas de extender el brazo, lo más frecuente es que lo extiendan hacia la situación aparente del objeto, y se equivoquen. Luego, suelen quedarse quietos un rato, con su mano y el objeto en su campo visual, antes de volver a extender el brazo y volver a fallar. Estos niños sin práctica se mostraron absolutamente incapaces de utilizar la visión de su mano para corregir su conducta en el acto de alcanzar algo.

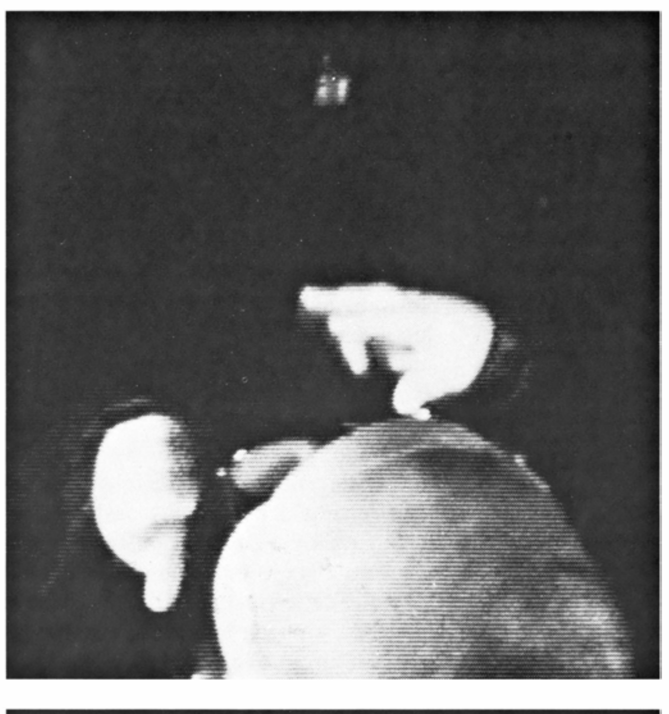
Por contra, niños mayores sin práctica y algunos menores con práctica precoz pudieron dirigir su mano, primero, hacia la situación incorrecta y, luego, tan pronto como su mano penetraba en su campo visual, corrigieron su movimiento y dirigieron el brazo hacia el objeto con absoluta precisión. De este modo, tales niños fueron capaces de utilizar la posición visible de su mano para corregir su movimiento. Niños normales que no hayan practicado adquieren esta capacidad aproximadamente a las 24 semanas de vida, mientras que niños con práctica precoz realizan esta tarea con éxito a las 19 semanas, aproximadamente.

Esta flexibilidad anticipada tuvo un precio, como pronto se encargó de demostrar un segundo experimento. Para éste, se colocó a los niños en una habitación débilmente iluminada. Se les mostró un juguete, pero se les impidió que lo cogieran hasta que se apagaran las luces. Una vez apagadas, tenían que alcanzarlo en plena oscuridad. Su conducta fue seguida a través de un monitor gracias a una cámara de televisión de rayos infrarojos. Los bebés más pequeños, como era de esperar según el experimento del prisma, no se distrajeron por la oscuridad: sus manos fueron derechas a coger el juguete. Los niños mayores y los ade-

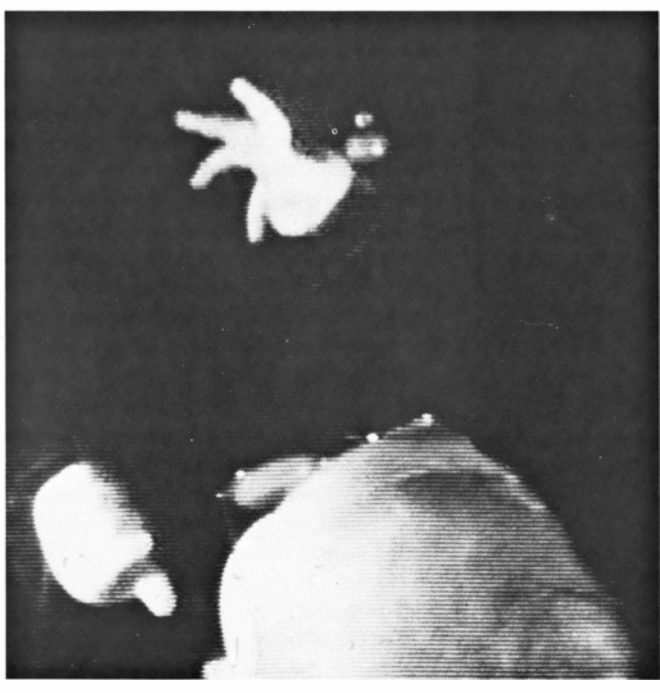
lantados se mostraron absolutamente inseguros. Pese a que también extendieron el brazo, no alcanzaron el objeto directamente buscándolo a tientas sin lograr agarrarlo. Parecía como si su capacidad para utilizar la guía visual les hubiera llevado a fiarse de ellas hasta tal punto que, al faltarles, estuvieran perdidos.

Si el cambio principal en el desarrollo de la capacidad del niño para alcanzar algo es la adquisición del control visual, ¿cómo aceleró la práctica durante la Fase 1 la aparición del control visual en la Fase 2? Es obvio que tratar de alcanzar un objeto con ayuda visual requiere más atención que sin dicha ayuda: para el bebé, tener que fijarse en el objeto y en su mano exige más atención que si sólo tiene que fijarse en el objeto. También es inmediato que, al principio, los niños no pueden prestar atención a la mano y al objeto a la vez. A cierta edad, la mano y el objeto parecen competir en el reclamo de su atención. La práctica precoz, por lo tanto, debería producir la aparición de la mano en el campo visual con mucho mayor frecuencia que sin dicha práctica. Para los muchachos adelantados, la mano sería una visión más familiar. Se ha demostrado a través de muchos experimentos que los objetos que son familiares exigen menos atención que los que no lo son. Por lo tanto, es posible que la práctica en alcanzar un objeto, durante la Fase 1, acelere la aparición de esta capacidad en la Fase 2, al hacer que los niños se familiaricen más con la luz de su propia mano.

Aunque esta explicación fuera correcta, no hay por qué esperar que pueda aplicarse también a la aparición repetitiva de otras habilidades. Pareció necesario buscar nuevas explicaciones para los otros tipos de repetición, por lo que











UN NIÑO MAYOR PROVISTO DE PRISMAS triangulares tiende la mano hacia la situación aparente de un objeto y también empieza por equivocarse. Sin embargo, cuando su mano entra en su campo visual, utiliza su visión para corregir su trayectoria y llevarla al objeto.







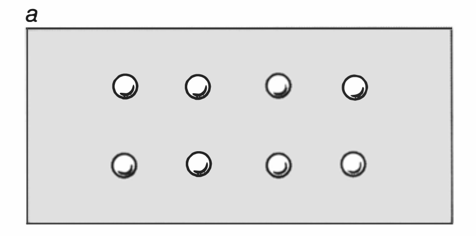
UN NIÑO CIEGO EQUIPADO CON UN SONAR ejerce un control activo sobre sus entradas auditivas, del mismo modo que un niño normal puede controlar sus entradas visuales cerrando sus ojos o mirando adonde quiera. El aparato emite ondas ultrasónicas que son reflejadas por los objetos. Luego, convierte los ecos en tonos audibles. La naturaleza de los tonos depende de la distancia, tipo y textura de los objetos. En esta secuencia, el niño ciego, llevado por un adulto hacia un poste, extiende sus brazos como lo haría un niño normal.

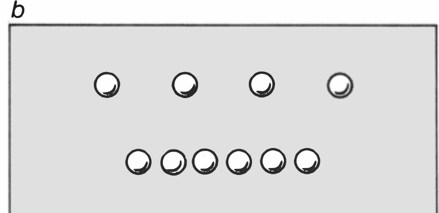
se renunció a la esperanza de formular una teoría general de la repetición en el desarrollo. En efecto, en seguida aparecieron explicaciones específicas para las distintas capacidades. Por ejemplo, la notable capacidad de los recién nacidos para imitar a los adultos desaparece a una cierta edad. Colwyn Trevarthen, de Edimburgo, señaló, sin embargo, que a los niños pertenecientes a una edad en que son incapaces de imitar a los adultos les encanta ser imitados. Si un niño es capaz de darse cuenta de que está siendo imitado, debe disponer exactamente de los mismos instrumentos perceptivos que necesitaría para poder imitar él a alguien. Por eso, el declinar de la conducta imitativa del bebé puede no implicar ninguna pérdida de la capacidad y sí indicar un cambio en la motivación. El niño sigue teniendo la capacidad de imitar pero escoge utilizarla para detectar cuándo los demás le están imitando a él.

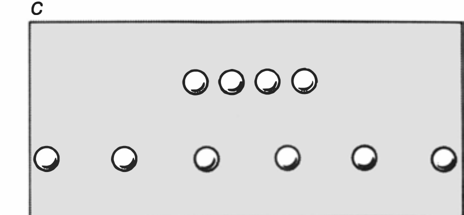
Una vez incluidos los cambios en la motivación en la lista de las posibles hipótesis referentes a las repeticiones imitativas, pasemos a lo que yo creo es la explicación correcta para el declive, a veces permanente, de la coordinación ojo-mano. Esta explicación se basa en la diferencia entre las condiciones normales de estimulación visual y las de estimulación auditiva. La situación del niño con respecto a la estimulación visual normalmente es activa: puede mirar cosas que le interesen y puede apartar la vista de las que le aburran o le molesten, o cerrar los ojos si así lo desea. Su situación con respecto a la estimulación auditiva es totalmente distinta: es una situación pasiva. El bebé no puede conectar los sonidos que le gustan y desconectar los que le disgustan; no puede cerrar sus oídos como podía hacer con sus ojos. En resumen, no tiene control alguno sobre su entrada auditiva.

Las situaciones pasivas de este tipo tienen importantes efectos sobre el desarrollo. Los clásicos experimentos sobre los efectos de la pasividad se hicieron sobre la vista, usando gatitos como sujetos. Los gatitos que fueron sometidos durante un período de tan sólo 30 horas a unas condiciones en las que no podían responder activamente a la estimulación visual se volvieron funcionalmente ciegos. Cuando después se les provocó con cualquier tipo de estimulación visual no respondieron.

Los resultados de los experimentos con los gatitos nos sugirieron que la razón de que los bebés perdieran su coordinación auditivo-manual estaba en que







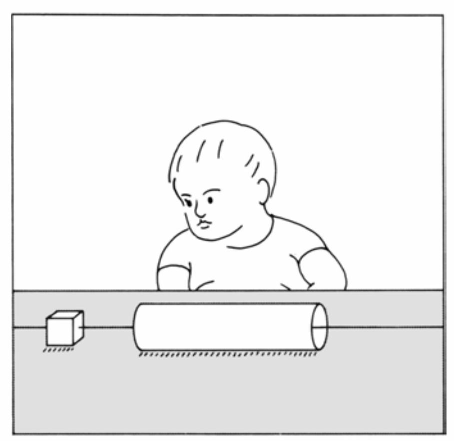
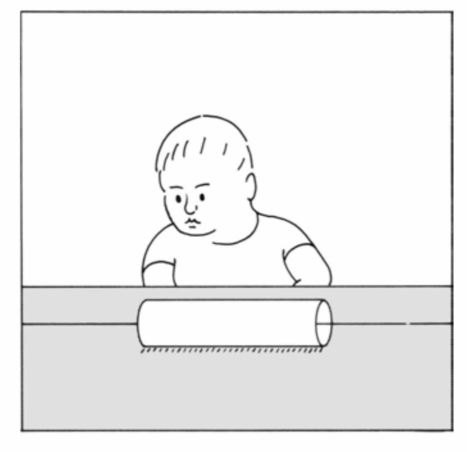
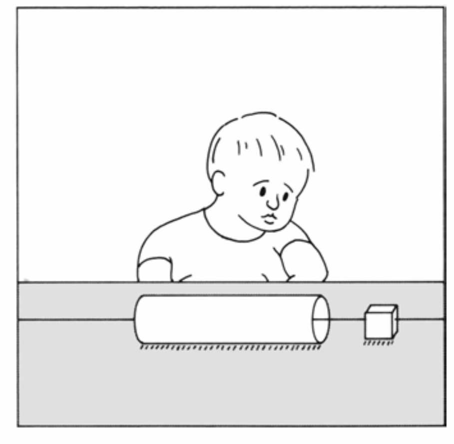
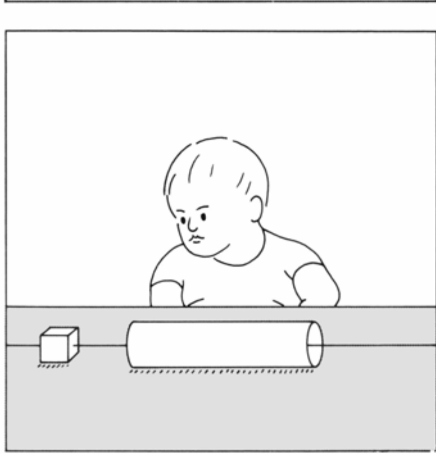
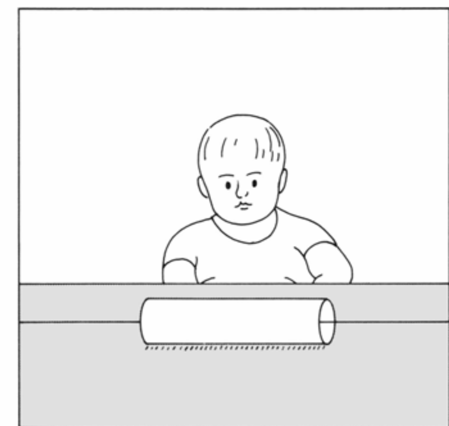
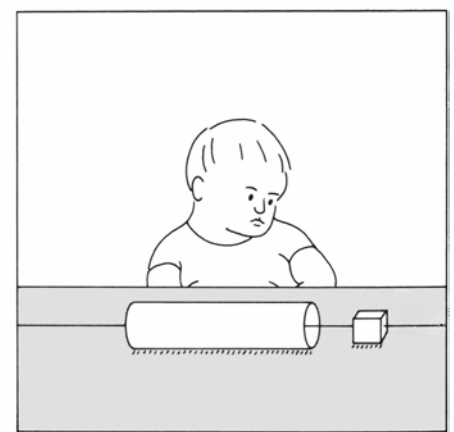
LA TAREA DE CONTAR, realizada por un niño con edad suficiente para hablar, implica el concepto de número. El experimentador muestra primero al niño dos tiras de caramelos *(a)* y se asegura de que el niño está de acuerdo en que hay el mismo número de caramelos en cada tira. Luego le muestra un par de tiras distinto (*b* y *c*) y permite que el niño tome la tira que prefiera. Lo que se pretende ver es si el niño asume o no la tira con más caramelos, independientemente de la longitud de la tira y de la distancia que separa un caramelo de otro en la tira. Si toma la tira con más caramelos omitiendo la colocación de las piezas, se puede asegurar que tiene capacidad primaria para contar.

permanecían pasivos ante la estimulación auditiva. ¿Cómo podríamos suministrar información auditiva a un niño de forma que él tuviera un papel activo?

Después de varios ensayos y errores descubrimos que la respuesta estaba en colocarle un aparato de ecolocalización ultrasónica. El aparato emitía pulsaciones de ondas sonoras a frecuencias ultrasónicas en un cono de una amplitud de 80 grados. Al ser la frecuencia del sonido tan elevada, las pulsaciones resultaban inaudibles. Los ecos ultrasónicos rebotaban en todo objeto que se encontrara en el campo del aparato. Este convertía dichos ecos en sonidos audibles, que eran canalizados directamente hacia los oídos del bebé. Cuanto más cercano a él estaba el objeto, más bajo era el tono del sonido que oía, y, cuanto más lejano, más alto. Los objetos situados a la derecha del niño producían un sonido más alto en su oído derecho y los situados a su izquierda lo producían en su oído izquierdo. Los objetos situados justo enfrente de él producían sonidos igualmente altos en ambos oídos. Los objetos duros producían un sonido nítido y, los blandos, confuso.

La característica más importante del aparato, sin embargo, consiste en que cualquiera que lo lleve puesto tiene un control directo sobre los sonidos que canaliza hacia sus oídos. El portador puede enfocar objetos que le interesen, alejarlo de objetos que le molesten, y por lo tanto silenciarlos, examinar objetos pasando por delante de ellos, etc. En otras palabras, el portador ejerce un control activo al menos sobre este tipo de estimulación auditiva. Si nuestra hipótesis sobre la desaparición de la normal coordinación auditivo-manual es correcta, el comportamiento dirigido mediante el aparato ultrasónico no debería desaparecer.

Este aparato sólo ha sido probado con un niño ciego de nacimiento. Los resultados, sin embargo, fueron absolutamente satisfactorios. No sólo no

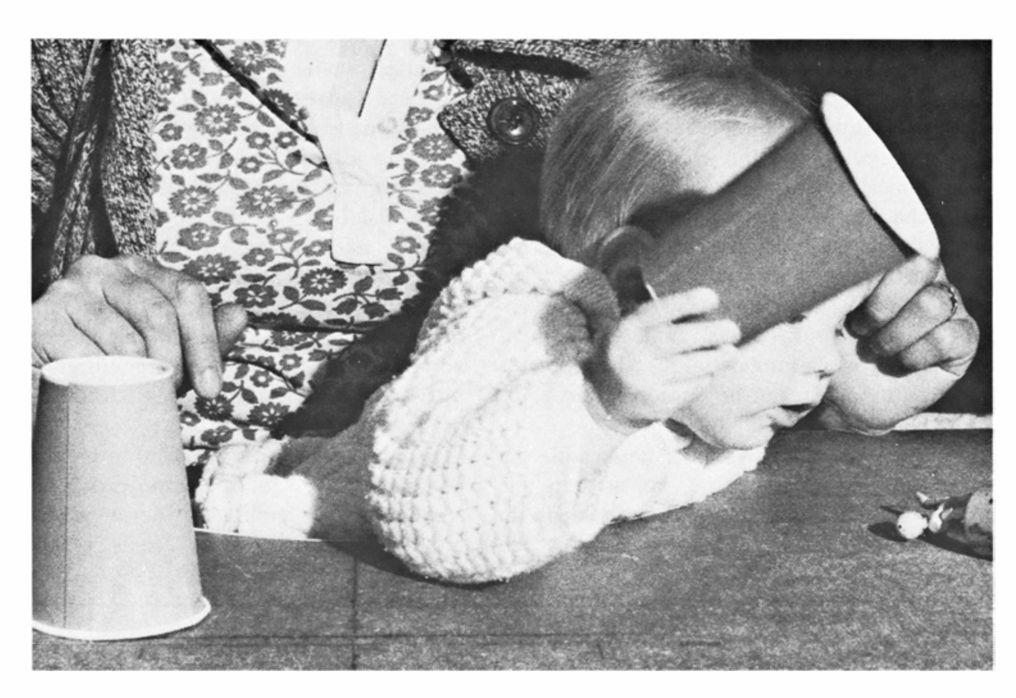







LA TAREA DE SEGUIMIENTO se pone a prueba mostrándole al niño un objeto que se introduce por el extremo de un túnel y que, pasados unos segundos, reaparece por el otro. Al principio, los niños pueden verse sorprendidos y aturdidos por este tipo de exhibición *(tres cuadros superiores).* Incluso pueden negarse a mirarla, hasta que aprenden que un objeto puede introducirse en otro y seguir existiendo. Después siguen el objeto con tanta precisión que son capaces de mover los ojos para captar el objeto, en cualquier punto *(tres cuadros inferiores).*

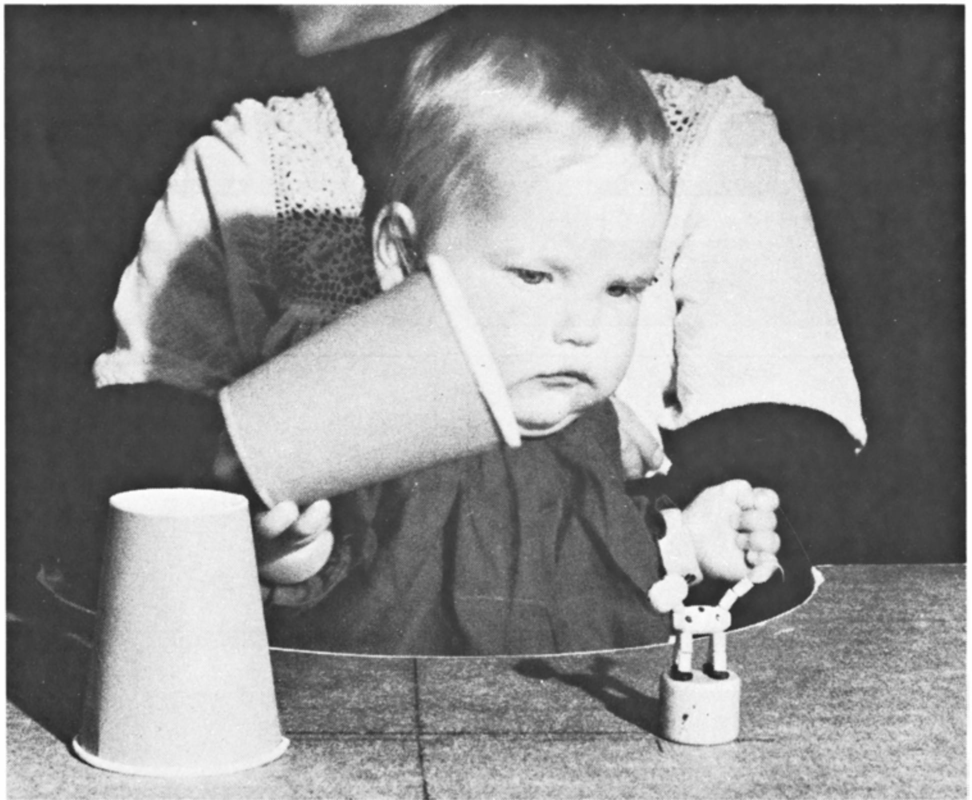
desapareció el comportamiento auditivo-manual, sino que, además, el niño desarrolló realmente algunas capacidades comparables a las adquiridas por un niño normal de su misma edad. Más aún, el experimento mostró claramente la flexibilidad del sistema perceptivo del recién nacido. Ningún organismo en la historia de la vida había recibido jamás las potencias sonoras que recibió ese niño y sin embargo, empezó a dar un significado a los sonidos, segundos después de haber conectado el aparato.

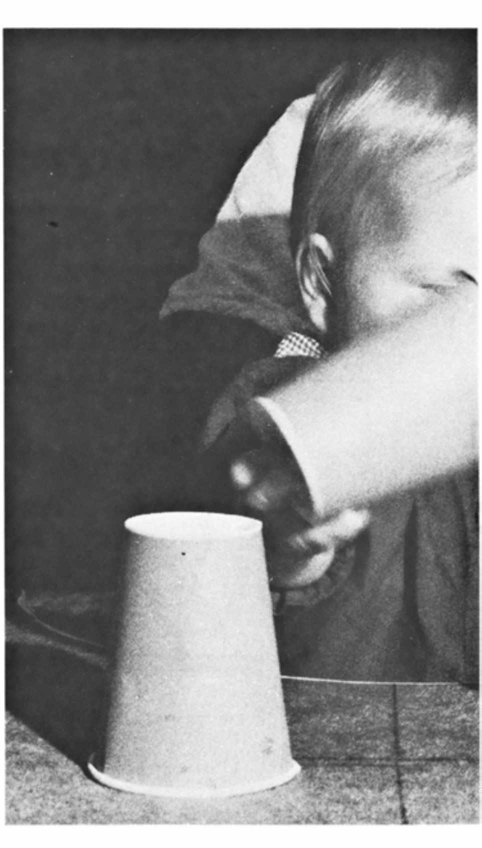
De los principales tipos de procesos repetitivos que he expuesto, el único para el que no he dado una explicación ha sido el de las repeticiones cognoscitivas. Disponemos realmente de una explicación, pero es sumamente compleja. No obstante, algunos de los experimentos que hemos ideado para probarla han arrojado una luz interesantísima sobre la naturaleza del desarrollo intelectual, especialmente durante la infancia.

Nuestra explicación está basada en datos obtenidos en experimentos realizados sobre el desarrollo a corto plazo. Consideremos uno muy sencillo sobre el hábito. Si a un niño se le muestra un cubo con la misma orientación por diez veces, y durante 30 segundos cada vez, progresivamente irá mirando menos al





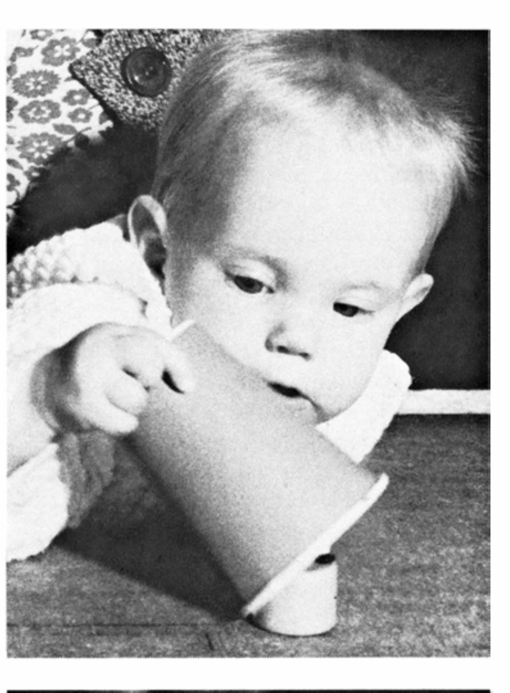


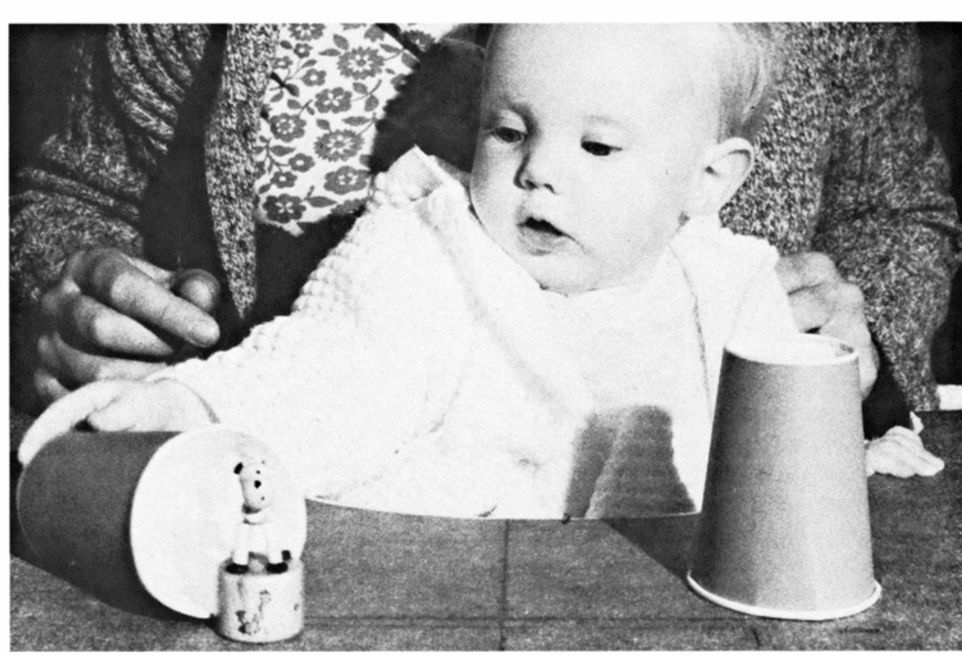


LA TAREA DE TRASLADO se sirve del concepto de que un objeto puede introducirse en otro y seguir existiendo, adquirida en la tarea de seguimiento. El niño ve cómo un adulto coloca un juguete debajo de uno de los dos vasos, y luego le anima a que escoja el vaso que contiene el juguete. Un niño con relativa experiencia en la tarea de seguimiento lo hace muy bien ***(tres fotografías superiores);*** **sin em-**

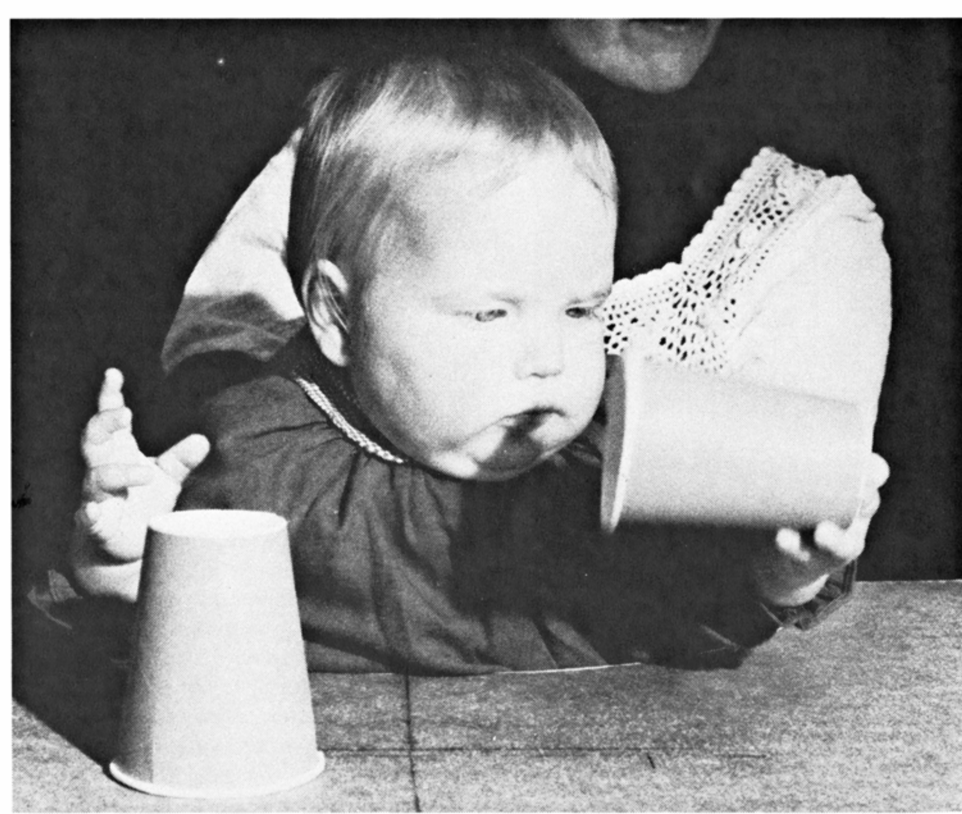
cubo. El nivel de atención decreciente indica que el niño se ha dado cuenta de que está viendo lo mismo cada vez. Supongamos ahora que le mostramos un cubo diez veces, pero con distinta orientación cada vez. El resultado es que el niño muestra el mismo descenso en el tiempo que dedica a mirar el vaso.

Este fenómeno proporciona una gran cantidad de información acerca de cómo recuerda los objetos un bebé. Es evidente que no puede retener en su memoria una imagen muy concreta del cubo en una determinada orientación, porque ésta es distinta cada vez. Esto significa que el bebé tiene que recordar, de una presentación a la siguiente, qué forma tiene un cubo, sin retener su orientación. Esta clase de memoria es bastante abstracta; en realidad tiene que ser casi tan abstracta como la misma palabra. No retiene detalles del objeto, ni siquiera algunos tan importantes como la orientación. Con todo, si se le da suficiente tiempo, el bebé puede llegar a desarrollar interiormente una descripción del objeto con minuciosidad, de tal forma que incluso un cambio insignificante podría suspender el descenso en su comportamiento visual. La descripción que un bebé va elaborando en su interior de un objeto puede psar de ser casi abstracta a ser totalmente concreta.









bargo, un niño con mucha práctica de seguimiento lo hace menos bien, pese a hacerlo mejor que otro niño sin ninguna práctica de ese tipo. Sobre todo si el niño ve cómo se coloca el juguete bajo el segundo vaso, después de haberlo visto colocado varias veces debajo del primero, tenderá a seguir buscándolo debajo del primero ***(tres fotografías inferiores).*** **El concepto, adquirido en esta tarea, ahora estorba al niño.**

En opinión de mis colegas, y mía, existe un tipo de proceso similar subyacente en: el niño, al ir creciendo, va elaborando progresivamente descripciones internas de los hechos para irlos concretando cada vez más. Un cambio de este tipo en favor de una descripción más específica actúa en el sentido de disminuir la probabilidad de que se realice el paso sin dificultades de una capacidad a otra; por eso aumenta la probabilidad de una aparente repetición. Consideremos el problema que se le presenta a un niño al ver un objeto que entra por un extremo de un túnel y sale por el otro. Al principio, puede negarse a mirar esa clase de exhibición. Una vez se ha dado cuenta de que el objeto que ve a uno y otro lado del túnel es el mismo –proeza nada fácil–, debe descifrar qué le sucede al objeto cuando está fuera de su vista.

En mi opinión, el primer descubrimiento del niño es el de que un objeto puede introducirse en otro y seguir existiendo. Esto constituye una hipótesis sobre el mundo relativamente abstracta; no perfeccionará notablemente, a buen seguro, la capacidad del niño para seguir el recorrido del objeto por el interior del túnel; pero tal hipótesis le permitirá al niño trasladar su inteligencia de la situación de seguimiento a otras situaciones.

Supongamos, pues, que un niño que ya comprende esta hipótesis ve ahora un juguete colocado debajo de un vaso al lado de otro vaso vacío. Ahora deberá comprender que el juguete está debajo de un vaso en concreto para luego ser capaz de cogerlo. Si se coloca el juguete debajo del otro vaso, deberá ser capaz de cogerlo de allí mismo donde se halla. Eso es exactamente lo que sucede si se enfrenta al niño ante semejante tarea de traslado.

Sin embargo, si después se le somete a más práctica de seguimiento en el túnel, ocurre algo completamente distinto. Al poco tiempo elabora unas pautas específicas de conducta sensomotora que le permiten seguir el objeto con absoluta eficacia. Por su comportamiento, demuestra que sabe que para ver el objeto que ha desaparecido por el extremo izquierdo del túnel debe mirar el extremo derecho después de x segundos. Su conocimiento de la naturaleza espacio-temporal de la tarea de seguir la trayectoria de un objeto adquiere extraordinaria precisión. Niños con dos semanas de experiencia en tareas de seguimiento no permanecen mucho tiempo mirando la exhibición, pero pueden mover sus ojos sin equivocarse para captar el objeto en cualquier punto del espacio.

Si a estos niños se les somete nuevamente a la prueba del juguete debajo del vaso, la superarán mejor que otros niños sin experiencia en el seguimiento. Sin embargo, no lo harán tan bien como otros niños a quienes se les ha ejercitado en tareas de traslado después de haber practicado con tareas de seguimiento, pero mucho menos que ellos. En concreto, si el niño ve el juguete colocado debajo del segundo vaso después de unas pocas pruebas en las que lo ha visto en el primero, tenderá a buscarlo debajo de éste. Así, el niño parece repetir una fase de su desarrollo, no comprendiendo por segunda vez la relación existente entre dos objetos cuando están el uno dentro del otro. ¿Qué provoca semejante repetición? A mi entender, lo que sucede es que el niño, con tanta práctica en seguir un objeto a través de un túnel, ha desarrollado unas pautas específicas en relación con este fenómeno que le estorban cuando se enfrenta a una situación similar, pero no idéntica. Un niño que ha desarrollado menos práctica de seguimiento posee el descubrimiento conceptual inicial (un objeto puede introducirse en otro y seguir existiendo) todavía fresco en su mente y le sirve de ayuda en la tarea de traslado.

Este tipo de modelo de desarrollo cognoscitivo puede explicar algunos casos curiosos que se observan en los procesos repetitivos, en que niños pequeños dan respuestas verbales correctas a un determinado problema mientras que otros niños mayores dan respuestas incorrectas al mismo problema. Aquí la idea subyacente se adquirió más tarde, en la infancia. Cuando los tests orales se realizan antes, no ha habido tiempo suficiente para que el descubrimiento inicial se haya especificado, hasta el punto de que el niño es incapaz de aplicarlo a otras situaciones. En niños mayores, sin embargo, el descubrimiento se ha hecho sumamente específico. La relación entre el problema inicial y el nuevo se ve, por consiguiente, oscurecida. Tienen que rastrear en su memoria en busca del descubrimiento inicial, equivocándose hasta que lo encuentran y dando la impresión de que repiten una fase anterior de su desarrollo cognoscitivo.

Las distintas explicaciones de los procesos repetitivos en el desarrollo parecen diferir, pues, según la repetición concreta que haya que explicar. Todas ellas tienen, no obstante, algo en común: apoyan la hipótesis de que el desarrollo psicológico, pese a sus aparentes cambios de dirección y repeticiones, es un proceso continuo y acumulativo.

El confinamiento de los quarks

¿Por qué no se ha observado todavía esta clase de partículas elementales, que permiten explicar tantas propiedades de las demás? Quizás se hallan retenidas en el interior de las otras partículas por fuerzas características de su propia naturaleza

Yoichiro Nambu

Una partícula elemental de la materia, definida rigurosamente, es aquella que no tiene estructura interna y que no puede ser rota en partículas constitutivas más pequeñas. A lo largo de los últimos diez años, más o menos, se ha ido comprobando que muchas partículas que durante largo tiempo se pensó que eran elementales, entre las cuales se contaban partículas tan familiares como el protón y el neutrón, no lo son en absoluto. Por contra, se manifiestan como estructuras compuestas formadas por otras entidades más fundamentales llamadas quarks, de forma análoga a como un átomo se compone de núcleo y electrones.

El modelo quark es una simplificación impresionante de la naturaleza. En la formulación original de la teoría se suponía que sólo existían quarks de tres especies, y que estas tres bastaban para explicar las propiedades de toda una clase de partículas con varias docenas de miembros. Cada miembro conocido de esta clase se podía entender como una combinación de quarks; más aún, cada combinación permitida de quarks daba origen a una partícula conocida. La correspondencia entre la teoría y los hechos observados parecía demasiado ajustada para ser accidental, y se emprendieron experimentos con el fin de detectar a los propios quarks.

Si los quarks son partículas reales, parece razonable que los podamos ver. Sabemos que un átomo consta de un núcleo y de una nube de electrones que rodea a éste, porque podemos dividir el átomo y estudiar sus constituyentes aisladamente. Sabemos que el núcleo, a su vez, está formado por protones y neutrones, porque podemos dividirlo en fragmentos e identificar tales partículas constituyentes. Es fácil idear un experimento parecido en el que partículas que creemos constituidas por quarks, tales como los protones, se descomponen violentamente. Sin embargo, cuando esto se lleva a cabo nos encontramos con que el producto final contiene sólo más protones y otras partículas familiares. No se ven objectos con las propiedades atribuidas a los quarks. Los físicos han buscado por todas partes, pero no han encontrado quarks libres.

Cabe, por supuesto, que en ningun experimento se haya buscado en el lugar correcto, ni con los instrumentos apropiados; pero ello parece hoy improbable. Cabe también que los quarks no existan, pero los físicos se resisten a abandonar una teoría que tiene una enorme fuerza teórica. La contundencia y el vigor de la teoría evidencia, de forma muy clara, que los quarks existen en el interior de partículas tales como el protón; por otra parte, el fracaso continuo de los experimentos encaminados a descubrir quarks libres induce a creer que los quarks no existen aislados. Para resolver esta paradoja no hay otra vía que enunciar nuevas hipótesis teóricas sobre los quarks y las fuerzas que los ligan entre sí. Debe probarse que los quarks existen, y que, por alguna razón, nunca aparecen aislados. Los físicos teóricos, que primero inventaron los quarks, tienen que dar ahora una explicación del confinamiento de los mismos en el interior de las partículas que ellos integran.

Las partículas que, según se cree, están formadas por quarks son los llamados hadrones; se distinguen porque interaccionan las unas con las otras mediante las interacciones fuertes, esto es, a través de las fuerzas que mantienen unidas las partículas constituyentes del núcleo atómico ("hadrón" deriva de la palabra griega *hadros*, que significa vigoroso y fuerte). Ninguna otra partícula es sensible a las referidas interacciones fuertes.

Los hadrones se dividen en dos grandes subgrupos, a saber: los bariones y los mesones. Estas dos clases de partículas difieren en muchas de sus propiedades; y así desempeñan un papel totalmente distinto en la estructura de la materia. Ahora bien, la distinción entre ellas aparece con la mayor nitidez en el modelo quark. Todos los bariones constan de tres quarks; asimismo, existen antibariones formados por tres antiquarks. El protón y el neutrón son los bariones de menor masa y los más familiares de entre éstos. Los mesones tienen una estructura distinta: constan de un quark ligado a un antiquark. El meson pi, o pión, es el mesón de menor masa.

Las propiedades de los hadrones quedarán mejor ilustradas si las comparamos con las propiedades del otro grupo importante de partículas restante: los leptones. Los leptones no son sensibles a las interacciones fuertes (de lo contrario serían hadrones). Contienen solamente cuatro tipos: el electrón, el muón, el neutrino de tipo electrónico y el neutrino de tipo muónico (juntamente con las cuatro antipartículas correspondientes). Parece que los leptones son realmente elementales, es decir, carecen de estructura interna. En efecto, aparentemente no tienen tamaño. Pueden representarse como puntos sin dimensiones, de modo que no cabe la posibilidad de asignarles una estructura interna.

Los hadrones difieren de los leptones en muchos aspectos, y éstos dan muchas pistas para entender su carácter compuesto. Los hadrones tienen un tamaño finito, si bien extraordinariamente pequeño: alrededor de 10^{-13} centímetros. Los experimentos en los que los protones o los neutrones chocan, a alta energía, con otras partículas dan una prueba bastante directa de que poseen una estructura interna: los campos eléctricos y magnéticos y el campo asociado con la interacción fuerte parecen, todos ellos, emanar de fuentes puntuales sitas dentro de las partículas. Por último, hay mu-

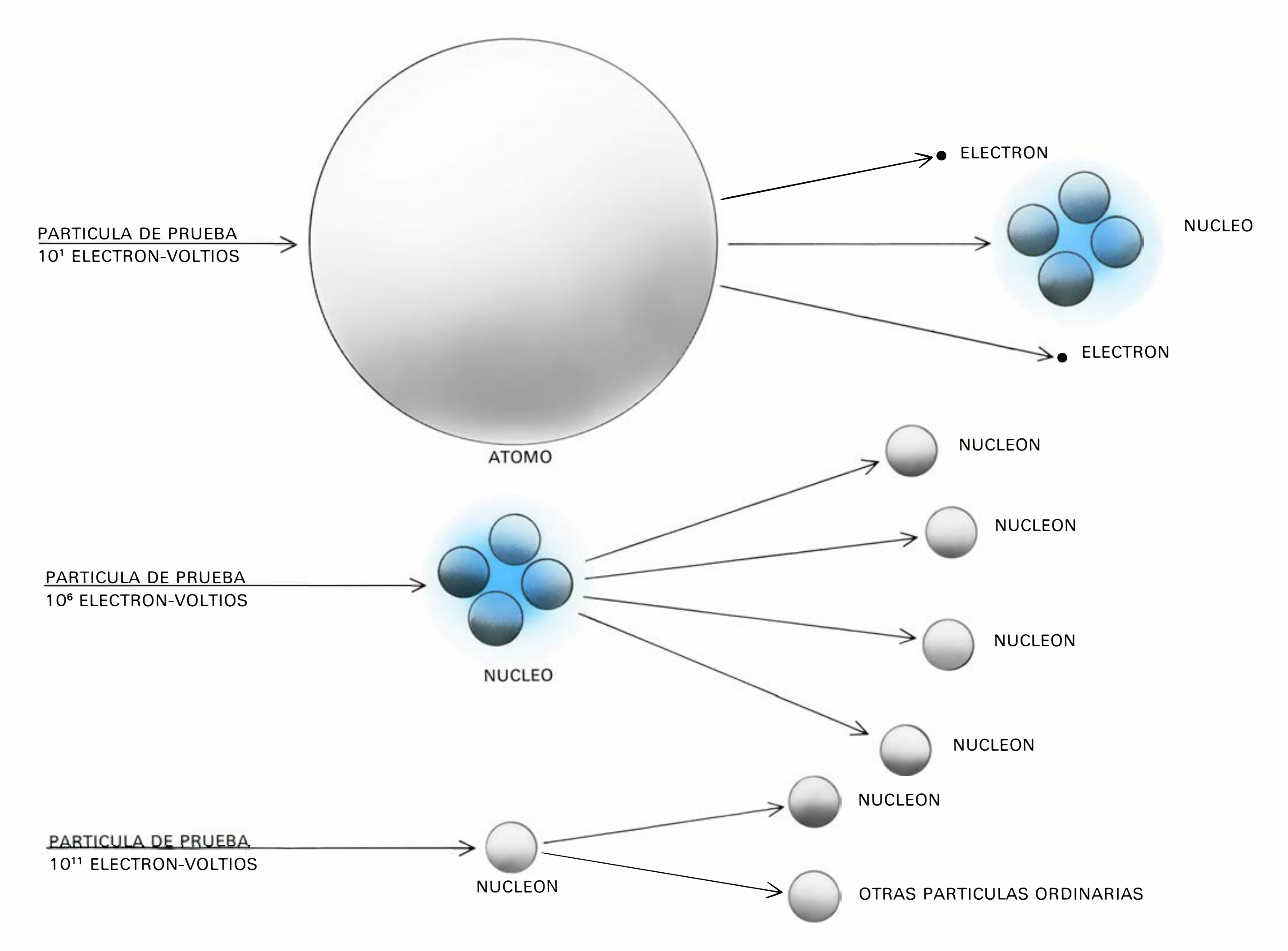
chísimos hadrones. Se conocen más de 100, muchos de ellos de vida media muy corta; y hay pruebas de que existen bastantes más que aun no han sido observados porque los aceleradores de partículas en funcionamiento no pueden aportar la energía suficiente para crearlos. No hay limitación clara al número de hadrones que pueden encontrarse cuando se construyan aceleradores mayores.

Fue la gran multiplicidad de hadrones lo que condujo a la formulación del modelo quark. Sin algún principio de organización, una colección tan nutrida de partículas parecía inmanejable, y la posibilidad de que todas ellas pudieran ser elementales ofendía a los que tenían la convicción, o al menos el deseo, de que la naturaleza fuera simple. La hipótesis de los quarks reemplazaba la gran variedad de hadrones por tres bloques constituyentes fundamentales, a partir de los cuales podían construirse todos los hadrones. El modelo fue propuesto, en 1963, por Murray Gell-Mann y George Zweig, independientemente uno del otro, aunque ambos del Instituto de Tecnología de California. Gell-Mann les dio el nombre de quarks, que tomó de la obra de James Joyce *Finnegans Wake* ("Three quarks for Muster Hark!").

La inspiración inmediata que dio origen a la hipótesis de los quarks fue el descubrimiento, hecho por Gell-Mann y por Yuval Ne'eman, éste de la Universidad de Tel-Aviv, de que todos los hadrones podían agruparse de forma lógica en familias, con unos pocos hadrones en cada una de ellas. Los mesones forman familias de una sola partícula y de ocho partículas; los bariones forman familias de una, ocho y diez partículas.

La clasificación de las partículas se hace de una manera más fácil tabulando sus propiedades de forma numerica. Cada número remite a una sola propiedad, y puede tomar únicamente ciertos valores discretos. Puesto que los números son asignados en unidades discretas, o cuantos, se les llama números cuánticos. Una lista completa de los números de una partícula la identifica totalmente y define su comportamiento.

La carga eléctrica es un número cuántico típico; la unidad fundamental de medida es la carga eléctrica del protón o la del electrón, y en estas unidades las cargas de todas las partículas que han sido observadas pueden expresarse como números enteros (tales como 0, +1 y −1). Otro número cuántico es el llamado número bariónico. A los bariones se les asigna convencionalmente el valor +1 y a los antibariones el valor −1. Los mesones tienen número bariónico 0. La extrañeza, propiedad de los hadrones in-



LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA ha sido examinada a escala cada vez más pequeña mediante procesos de descomposición violenta. El átomo puede ser reducido a sus componentes golpeándolo con un proyectil dotado de relativamente poca energía: unos cuantos electrón-voltios. Este es el llamado proceso de ionización; en su caso extremo termina en el aislamiento de los electrones libres y un núcleo. El núcleo puede ser dividido también, aunque la energía necesaria tiene que ser más alta. El núcleo se divide en protones y neutrones libres, que se llaman colectivamente nucleones. Los nucleones parecen estar compuestos de entidades puntuales llamadas quarks; podría esperarse que los quarks fueran liberados al hacer incidir sobre un nucleón una partícula de prueba de energía suficientemente alta. Cuando se intenta hacer esta experiencia no aparecen, sin embargo, quarks libres, ni siquiera a las energías más altas que ahora se pueden alcanzar (unos cuantos centenares de miles de millones de electrón-voltios). Unicamente aparecen otras partículas ordinarias, incluso muchas que se piensa que están hechas de quarks. Una explicación posible de este efecto es que los quarks están confinados de forma permanente dentro del nucleón.

troducida en los años 1950 para explicar las vidas medias extrañamente largas de algunas partículas de gran masa, se pueden también representar mediante un número cuántico que toma únicamente valores enteros.

Uno de los números cuánticos más importantes es el momento angular de spin. De acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica, el estado de rotación de una partícula es una de sus propiedades intrínsecas, y la partícula debe, por tanto, tener siempre un momento angular especificado e invariante. (El momento angular se mide en unidades de la constante de Planck dividida por 2 π. La constante de Planck es $6{,}6 \times 10^{-27}$ ergios-segundo.) Hay que establecer una distinción crucial entre las partículas cuyos spins tienen valores semi-impares (esto es, la mitad de un número impar, tales como 1/2 o 3/2) y las partículas que tienen spin entero (tal como 0, 1 o 2). Como veremos, esta distinción determina el comportamiento de las partículas cuando se agrupan formando un sistema ligado, pero de momento nos basta saber que todos los bariones tienen spin semi-impar y todos los mesones tienen spin entero.

Las familias de hadrones definidas por Gell-Mann y Ne'eman están relacionadas por el momento angular de spin. Todos los miembros de una familia dada tienen el mismo spin. Dentro de una familia, los miembros se distinguen entre sí mediante otros dos números cuánticos, a saber: el spin isotópico y la hipercarga. A pesar de su nombre, el spin isotópico no tiene nada que ver con el momento angular; viene determinado por el número de partículas incluidas en un determinado grupo. La hipercarga queda determinada por las cargas eléctricas de aquellas partículas y está también relacionada con el número bariónico y la extrañeza. De entre las distintas combinaciones de los valores que pueden formar estos dos números cuánticos, cabe construir un cuadro para cada familia de hadrones. Estos cuadros, que pueden tener una, ocho o diez posiciones predicen la existencia de todos los hadrones conocidos y de ningún otro. La formación de estos cuadros puede ser descrita formalmente mediante la rama de las matemáticas conocida con el nombre de teoría de grupos. Así se dice que los cuadros son representaciones del grupo de simetría SU (3), que indica el grupo de matrices unitarias unimodulares 3×3.

Los quarks vienen también descritos mediante un grupo de simetría SU (3). Gell-Mann designó los quarks mediante los símbolos arbitrarios *u, d* y *s,* que son las iniciales de "up", "down" y "sideways". Todos ellos tienen el mismo momento angular de spin, 1/2 unidad, y en el grupo SU (3) forman ellos solos una familia; se trata, por supuesto, de una familia de tres miembros. Los tres miembros de la familia de los quarks se distinguen por tener distintos valores del spin isotópico y de la hipercarga; también difieren en otros números cuánticos. Las cargas eléctricas que se les asignan son particularmente raras. El quark *u* tiene una carga de +2/3, y el quark *d* y el quark *s* tienen ambos una carga de −1/3. El número bariónico de los quarks es también fraccional; todos los quarks tienen número bariónico +1/3. La extrañeza, sin embargo, es aún un número entero; los quarks *u* y *d* tienen extrañeza cero y el quark *s* tiene extrañeza −1. Para los correspondientes antiquarks, cuyos símbolos son $\bar{u}$, $\bar{d}$ y $\bar{s}$, la magnitud de cada uno de estos números cuánticos es la misma pero el signo es el contrario.

La regla fundamental para construir los hadrones a partir de los quarks es muy simple: establecer que todos los números de un hadrón se obtienen sumando los números cuánticos de los quarks que lo constituyen. El protón, por ejemplo, está constituido de dos quarks de tipo *u* y un quark de tipo *d,* una configuración que se escribe como *uud.* Las cargas eléctricas son por tanto +2/3 +2/3 −1/3, que suman +1. El número bariónico es +1/3 +1/3 +1/3, o +1; y puesto que la extrañeza de cada uno de estos quarks es cero, la suma también será cero. Todas las sumas están de acuerdo con las propiedades medidas del protón.

El mesón pi cargado positivamente está formado por un quark *u* y un antiquark $\bar{d}$. Las cargas eléctricas de estos quarks son +2/3 y +1/3, que dan un total de +1, y los números bariónicos son +1/3 y −1/3, que suman cero, que es el número bariónico de un mesón. La extrañeza también es cero. El número cuántico momento angular de spin exige un cálculo ligeramente más elaborado porque los spins de los quarks se pueden alinear de dos formas distintas, y esta alineación determina los signos que deben darse a los números cuánticos de spin cuando se suman. Sin embargo, combinaciones de tres quarks o de tres antiquarks (bariones y antibariones) tienen siempre spin semi-impar, mientras que combinaciones de un quark y un antiquark (mesones) tienen siempre spin entero.

La gran fuerza del modelo quark es que, mediante este simple procedimiento aditivo, el modelo predice correctamente los números cuánticos de todos los hadrones conocidos. Nótese, en particular, que todas las combinaciones permitidas de los quarks dan valores enteros de la carga eléctrica y del número bariónico, y que no existen otras combinaciones para las que esto sea cierto (excepto en el caso trivial de múltiplos de las combinaciones permitidas). Más aun, todos los hadrones conocidos pueden construirse mediante tres quarks o con un quark y un antiquark.

En los últimos años se ha ido haciendo evidente que puede existir una cuarta especie de quarks, que tiene un nuevo número cuántico algo parecido a la extrañeza y al que se da, arbitrariamente, el nombre de encanto. El nuevo quark

			SPIN (J)	CARGA ELECTRICA (Q)	NUMERO BARIONICO (B)	EXTRAÑEZA (S)	ENCANTO (C)
QUARKS	(ARRIBA)	u	½	+⅔	⅓	0	0
	(ABAJO)	d	½	−⅓	⅓	0	0
	(EXTRAÑO)	s	½	−⅓	⅓	−1	0
	(ENCANTADO)	c	½	+⅔	⅓	0	+1
ANTIQUARKS	(ARRIBA)	$\bar{u}$	½	−⅔	−⅓	0	0
	(ABAJO)	$\bar{d}$	½	+⅓	−⅓	0	0
	(EXTRAÑO)	$\bar{s}$	½	+⅓	−⅓	+1	0
	(ENCANTADO)	$\bar{c}$	½	−⅔	−⅓	0	−1

LAS PROPIEDADES DE LOS QUARKS vienen explicadas asignándoles números cuánticos, que pueden tomar únicamente ciertos valores discretos. En el modelo quark original habría tres clases de quarks, denotados por *u* y *d* (de "up" –arriba– y "down" –abajo–), y *s* (por "sideways" –oblicuo– o "strange" –extrañeza–). Hay pruebas ya de una cuarta especie de quarks, denotados por *c* (por "charm", encanto). Los quarks tienen carga eléctrica fraccionaria y valores también fraccionarios del número bariónico, un número cuántico que distingue entre dos grupos de partículas. El número cuántico de spin refleja su momento angular intrínseco; los números cuánticos de extrañeza y de encanto reconocen propiedades especiales de los quarks *s* y *c.* Por cada quark existe un antiquark, con números cuánticos opuestos.

COLORES DE LOS QUARKS

SABORES DE LOS QUARKS		ROJO	VERDE	AZUL
(ARRIBA)	u	Q = +2/3 B = +1/3	Q = +2/3 B = +1/3	Q = +2/3 B = +1/3
		Q = 0 **B = 0**	**Q = +1** **B = 0**	**Q = +1** **B = +1**
(ABAJO)	d	Q = −1/3 B = +1/3	Q = −1/3 B = +1/3	Q = −1/3 B = +1/3
		Q = −1 **B = 0**	**Q = 0** **B = 0**	**Q = 0** **B = +1**
(EXTRAÑO)	s	Q = −1/3 B = +1/3	Q = −1/3 B = +1/3	Q = −1/3 B = +1/3
		Q = −1 **B = 0**	**Q = 0** **B = 0**	**Q = 0** **B = +1**
(ENCANTO)	c	Q = +2/3 B = +1/3	Q = +2/3 B = +1/3	Q = +2/3 B = +1/3
		Q = 0 **B = 0**	**Q = +1** **B = 0**	**Q = +1** **B = +1**

UN NUMERO CUANTICO ADICIONAL de los quarks es el llamado color, que puede tomar tres valores, representados aquí por tres colores primarios: el rojo, el verde y el azul. En contraste con el color, las denominaciones originales de los quarks *u, d, s* y *c* se designan, a veces, por sabores. (Tanto el color como el sabor son expresiones convencionales; no tienen nada que ver con el significado normal.) Un quark de un cierto sabor se supone que puede existir en los tres estados de color. En un modelo *(recuadros en blanco)* los quarks rojo, verde y azul de un sabor dado son indistinguibles; tienen el mismo valor de la carga eléctrica (Q), del número bariónico (B) y de todos los otros números cuánticos. En otra teoría *(recuadros en gris)*, propuesta por el autor y por M-Y Han, los quarks de distintos colores difieren en la carga eléctrica y en el número bariónico; a estos números cuánticos se les puede dar valores enteros. No hay razones para excluir definitivamente el modelo de Han-Nambu; sin embargo, en el artículo presente se suponen cargas fraccionarias.

(cuyo símbolo es *c*) añade otra dimensión al grupo de simetría que describe los hadrones y predice la existencia de una multitud de nuevas partículas, algunas de las cuales puede que ya hayan sido encontradas. La incorporación del encanto al modelo quark, cosa que parece cada vez más justificada por las pruebas experimentales, tiene varios rasgos atractivos, y puede considerarse que fortalece el modelo; sin embargo, apenas incide en el panorama del confinamiento de los quarks.

En muchos aspectos, los quarks son como los leptones. Ambas clases de partículas pueden representarse, al parecer, como puntos sin dimensiones, y, si no tienen extensión, tampoco tendrán, presumiblemente, estructura interna. Todos los quarks y todos los leptones comparten la propiedad de tener spin 1/2 unidad. Por último, si la hipótesis del encanto es correcta, entonces habrá cuatro miembros por cada grupo; en efecto, lo atrayente de esta simetría fue uno de los principales motivos para introducir el concepto de encanto. (Por otra parte, cuatro no es necesariamente el número final de quarks y de leptones. Ambos grupos podrían tener nuevos miembros todavía por descubrir.)

La semejanza entre los quarks y los leptones no es superficial, sino que hay diferencias importantes entre estas dos clases de partículas fundamentales. En primer lugar, los quarks participan en las interacciones fuertes, mientras que los leptones no lo hacen. Los quarks forman también agregados de partículas (los hadrones), en tanto que no existen estructuras compuestas análogas constituidas por leptones. Sin embargo, ¿por qué los quarks forman sólo ciertas agregaciones bien definidas, las constituidas por tres quarks o por un quark y un antiquark? Se pueden imaginar muchas otras combinaciones –cuatro quarks, dos quarks, un quark y dos antiquarks, incluso estados formados por centenares o miles de quarks– pero no hay ninguna prueba de que exista ninguna de ellas. Un estado de particular interés es el constituido por un quark aislado. Mientras que los leptones aislados son frecuentes, ¿qué propiedad característica de los quarks les prohíbe aparecer en solitario?

La doctrina que aportó las primeras soluciones especulativas a esas preguntas se introdujo para subsanar un fallo notable de la teoría de los quarks. El fallo afectaba al conflicto que aparecía entre el comportamiento de los quarks y uno de sus números cuánticos, el momento angular de spin. Para predecir correctamente el spin de los hadrones hay que asociar un spin de 1/2 unidad a cada uno de los quarks. Sin embargo, la mecánica cuántica da reglas para el comportamiento de las partículas de spin semi-impar, que los quarks no parecen obedecer.

Las reglas de la mecánica cuántica postulan una conexión entre el spin de una partícula y su "estadística", es decir, el conjunto de reglas que determina cuántas partículas idénticas pueden ocupar un determinado estado. Las partículas de spin entero obedecen la estadística de Bose-Einstein, que permite colocar un número ilimitado de partículas en un determinado estado. Las partículas de spin semi-impar obedecen la estadística de Fermi-Dirac, que exige que dos partículas idénticas no puedan ocupar el mismo estado. Este es el principio de exclusión formulado por Wolfgang Pauli, el equivalente mecánico-cuántico de la noción intuitiva de que no pueden haber dos cosas en el mismo lugar al mismo tiempo.

La aplicación más familiar de la estadística de Fermi-Dirac y del principio de exclusión con ella asociada tiene lugar en la física atómica. Gobierna la forma en que los electrones (que, por ser leptones, tienen spin 1/2) llenan las orbitales, o niveles energéticos, que rodean al núcleo. Si un orbital contiene un electrón, se le puede añadir otro, con tal que su spin esté alineado en la dirección opuesta al del primer electrón. Con spins opuestos, los electrones no tienen números cuánticos idénticos y por tanto pueden ocupar el mismo estado, en este caso un orbital atómico. Como hay únicamente dos direcciones posibles para el spin, todos los demás electrones quedan permanentemente excluidos de este orbital.

La conexión entre el spin y la estadística no acaba de comprenderse bien a nivel teórico, pero no hay duda de su existencia. De hecho, se han dado pruebas formales de que el principio de exclusión debe ser obedecido por todas las partículas de spin semi-impar, sin excepción. Igual que los electrones, los quarks se mueven en orbitales, aunque su movimiento se mide no con relación a un núcleo sino en la mutua relación de los unos a los otros o alrededor de su centro de masas común. Para las familias de hadrones de menor masa todos los quarks deberían estar en el mismo orbital: el menor de ellos. Por consiguiente, en un hadrón no pueden existir dos quarks con los mismos números cuánticos.

En el modelo quark del mesón las exigencias de la estadística de Fermi-Dirac son fáciles de satisfacer. Las dos partículas que forman un mesón son un quark y un antiquark, y sus números cuánticos

serán por tanto distintos (en algunos casos, exactamente los opuestos). En los bariones, sin embargo, el spin y la estadística dan origen a normativas conflictivas. En tres bariones (*uuu, ddd* y *sss*), por lo menos, los tres quarks tienen números cuánticos idénticos. Como hay tres partículas en un barión, al menos dos de ellas deben tener sus spins alineados de la misma forma y en muchos casos los tres spins deben apuntar a la misma dirección. Parece que queda violado el principio de exclusión.

O. W. Greenberg, de la Universidad de Maryland, fue quien primero aportó una estrategia para evitar esta incómoda conclusión. Greenberg sugirió que los quarks podían no obedecer la estadística de Fermi-Dirac y que su comportamiento vendría gobernado por un conjunto de reglas no convencionales que él llamó paraestadísticas de Fermi de orden tres. Mientras que en la estadística de Fermi-Dirac un estado puede ser ocupado por sólo una partícula, en la paraestadística de Fermi puede ser ocupado por tres partículas, pero no por más.

Otra forma de enfrentarse con el problema fue sugerida, más tarde, por H. Y. Han, de la Universidad de Duke, y por mí, e, independientemente, por A. Tawkhelidze, del Instituto de Investigación Nuclear de Rusia, y por Y. Miyamoto, de la Universidad de Tokio. En lugar de cambiar las reglas, nosotros cambiamos los quarks. Dando a cada quark un nuevo número cuántico con tres valores posibles, se logra que todos los quarks en un barión sean de especies distintas y, por tanto, que estén en distintos estados mecánico-cuánticos. Sólo es necesario un mecanismo que asegure que, en todos los casos, cada uno de los quarks posea un valor distinto del nuevo número cuántico. Este nuevo número cuántico se suele conocer con el nombre de color. Para los tres valores del número cuántico es conveniente adoptar los tres colores primarios rojo, verde y azul; los antiquarks tienen anticolores, que pueden representarse mediante los complementarios de los primarios, cian, magenta y amarillo, respectivamente (ninguno de estos términos tiene, por supuesto, relación alguna con su significado convencional; son nombres arbitrarios).

La paraestadística de Fermi puede considerarse como un caso particular de la hipótesis del color. Las dos teorías son equivalentes si se parte de la suposición de que el color sería totalmente inobservable. En cuyo caso, quarks de distintos colores parecerían idénticos en todas sus propiedades, y, como no habría forma de distinguir unos de otros, parecería ocurrir que quarks idénticos seguirían estadísticas no convencionales. El color sería invisible o, dicho de otra forma, la naturaleza sería ciega al color. La hipótesis del color permite, sin embargo, que el color sea visible en ciertas circunstancias.

La introducción del color triplica necesariamente el número de los quarks. Si únicamente se consideran los tres quarks originales, entonces, al introducir el color hay nueve; si se incluye el quark encantado, también éste debe tener variedades rojo, verde y azul, y el número total de quarks asciende a 12. El número de hadrones, sin embargo, no sufre aumento; la hipótesis del color

PROPIEDADES	QUARKS CONSTITUYENTES						HADRONES
	u		u		d		PROTON (p)
SPIN (J)	(½,½)	+	(½,½)	+	(½,−½)	=	(½,½)
CARGA ELECTRICA (Q)	⅔	+	⅔	−	⅓	=	+1
NUMERO BARIONICO (B)	⅓	+	⅓	+	⅓	=	+1
EXTRAÑEZA (S)	0	+	0	+	0	=	0
ENCANTO (C)	0	+	0	+	0	=	0

			u		$\bar{d}$		PION (π^+)
SPIN (J)			(½,½)	+	(½,−½)	=	(0,0)
CARGA ELECTRICA Q)			⅔	+	⅓	=	+1
NUMERO BARIONICO (B)			⅓	−	⅓	=	0
EXTRAÑEZA (S)			0	+	0	=	0
ENCANTO (C)			0	+	0	=	0

	$\bar{u}$		$\bar{d}$		$\bar{d}$		ANTINEUTRON ($\bar{n}$)
SPIN (J)	(½,−½)	+	(½,½)	+	(½,½)	=	(½,½)
CARGA ELECTRICA (Q)	−⅔	+	⅓	+	⅓	=	0
NUMERO BARIONICO (B)	−⅓	−	⅓	−	⅓	=	−1
EXTRAÑEZA (S)	0	+	0	+	0	=	0
ENCANTO (C)	0	+	0	+	0	=	0

	u		d		s		LAMBDA (Λ^0)
SPIN (J)	(½,½)	+	(½,−½)	+	(½,½)	=	(½,½)
CARGA ELECTRICA (Q)	⅔	−	⅓	−	⅓	=	0
NUMERO BARIONICO (B)	⅓	+	⅓	+	⅓	=	+1
EXTRAÑEZA (S)	0	+	0	−	1	=	−1
ENCANTO (C)	0	+	0	+	0	=	0

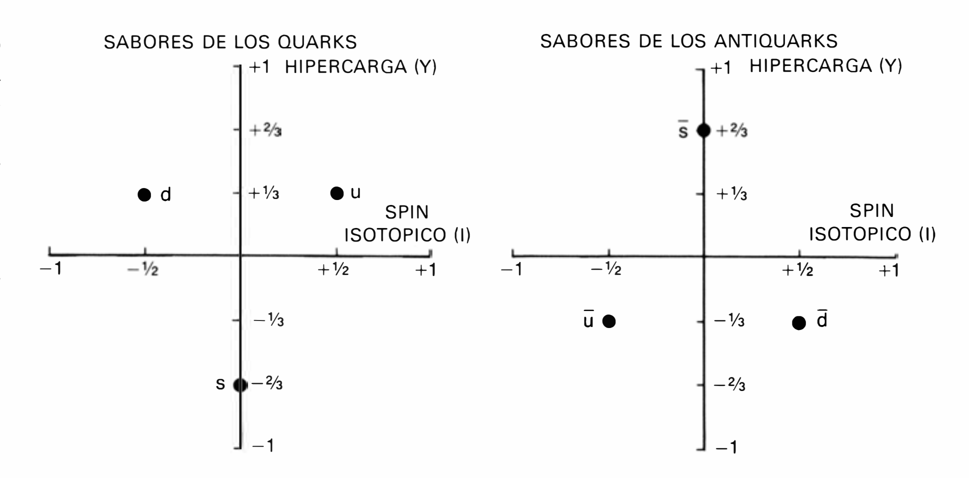
			c		$\bar{u}$		MESON ENCANTADO (D^0)
SPIN (J)			(½,½)	+	(½,−½)	=	(0,0)
CARGA ELECTRICA (Q)			⅔	−	⅔	=	0
NUMERO BARIONICO (B)			⅓	−	⅓	=	0
EXTRAÑEZA (S)			0	+	0	=	0
ENCANTO (C)			1	+	0	=	+1

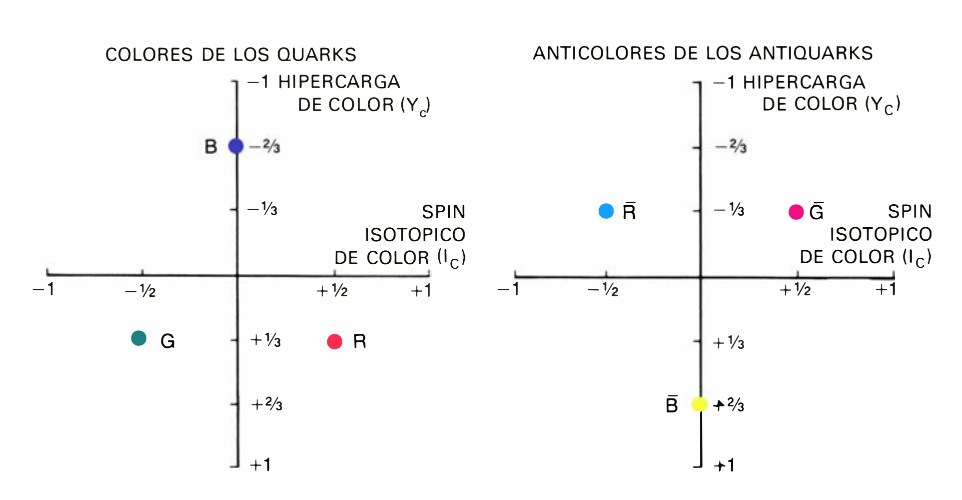
LOS QUARKS SE COMBINAN para formar una clase de partículas observadas, llamadas hadrones. Son posibles dos clases distintas de combinaciones de quarks. En una de ellas, se ligan tres quarks para formar un barión (como el protón) o tres antiquarks para formar un antibarión (como el antineutrón). En la otra, se ligan un quark y un antiquark para formar un mesón (como el pión). Las propiedades de estos hadrones vienen determinadas por la sencilla regla de que los números cuánticos de un hadrón son las sumas de los números cuánticos de los quarks. Todas las combinaciones permitidas de los quarks conducen a valores enteros de la carga eléctrica. Los números bariónicos se suman de tal forma que todos los bariones tienen valor +1, los antibariones −1 y los mesones 0. Las partículas extrañas, como el barión lambda, son las que tienen al menos un quark *s;* las partículas encantadas tienen al menos un quark *c.* El número cuántico de spin es un vector y exige una aritmética más complicada, pero el resultado de su composición es que todos los bariones y antibariones tienen spin semi-impar y todos los mesones tienen spin entero. El gran éxito de la teoría quark es que todas las combinaciones permitidas dan origen a hadrones conocidos y ninguna otra combinación lo hace. El problema del confinamiento de los quarks es el por qué existen únicamente estas combinaciones y por qué no se han observado quarks aislados.

no predice nuevas partículas. El número de hadrones no cambia a causa de la forma especial en que los colores se distribuyen entre los quarks de un hadrón. Si los colores deben resolver el problema de la estadística de los quarks, es esencial que un barión contenga un quark de cada color; si, por ejemplo, un barión pudiera estar formado por tres quarks rojos, entonces los números cuánticos de todos los quarks podrían muy bien ser idénticos. Sólo si los tres colores están representados de forma idéntica se puede asegurar que se satisfará el principio de exclusión. Puesto que hemos asignado a los quarks los colores primarios, tal combinación podría ser llamada blanca, o sin color. Como veremos, la teoría implica que todos los hadrones, tanto los bariones como los mesones, carezcan de color. Los bariones están compuestos de cantidades iguales de rojo, verde y azul; los mesones, de mezclas iguales de cada color con su anticolor.

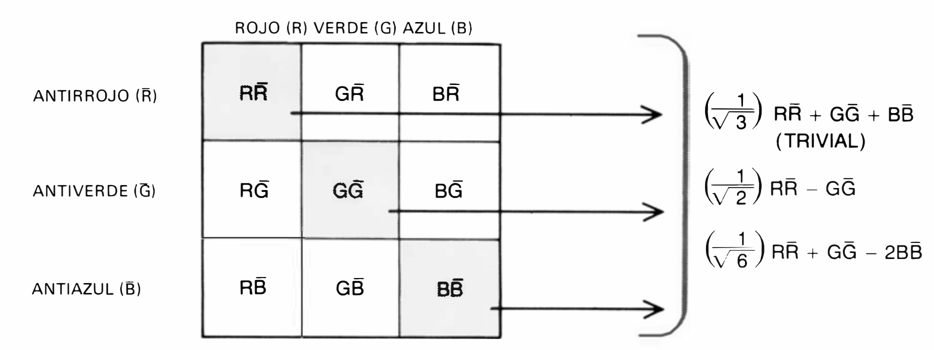
El tratamiento formal de los colores de los quarks implica postular otro grupo de simetría SU (3), exactamente análogo al que determina las restantes propiedades de los quarks. Los dos números cuánticos que determinan los colores de los quarks se denominan, por analogía al grupo SU (3) original, spin isotópico de color e hipercarga de color. Las propiedades determinadas por la simetría SU (3) original, algunas veces, reciben el nombre de sabores de los quarks; el sabor, a diferencia del color, es fácilmente observable en los experimentos; como si fueran saboreables. Los símbolos *u, d, s* y *c* representan los sabores de los quarks y determinan todas las propiedades observables de los hadrones que ellos forman; así, por ejemplo, la carga eléctrica. La simetría entre los sabores no es perfecta, y los quarks de distintos sabores tienen masas ligeramente distintas. El color, por el contrario, es una simetría exacta; en la formulación usual de la teoría, un quark de un sabor dado tiene las mismas propiedades y la misma masa independientemente de su color.

El color se introdujo en la teoría de los quarks como un elemento ad hoc para solventar el problema de la estadística de los quarks. Y ha llegado a convertirse en una característica central del modelo. En particular, se cree que determina las fuerzas que ligan los quarks entre sí en el interior de un hadrón, y, por tanto, tienen una influencia profunda en el confinamiento de los quarks. En este contexto, comienza a entenderse





LA CLASIFICACION DE LOS QUARKS viene regida por una simetría fundamental de la naturaleza. Los sabores de los quarks están determinados por dos números cuánticos, el spin isotópico y la hipercarga; cada quark o antiquark representa una combinación única de estos números. El color viene determinado por otros dos números cuánticos, llamados por analogía spin isotópico de color e hipercarga de color. El sabor y el color pueden describirse a través del concepto de grupo de simetría. El sabor es una "simetría rota" porque quarks con distintos sabores difieren en propiedades tales como la masa y la carga eléctrica. El color es una simetría exacta: dos quarks del mismo sabor pero de color diferente se distinguen sólo en su color y no en lo demás. Se cree que los colores de los quarks generan las fuerzas que ligan los quarks. Estas fuerzas resultan de dos clases de campos, asociados a los números cuánticos de spin isotópico de color y de hipercarga de color.



LOS GLUONES COLOREADOS son las partículas que transmiten las fuerzas entre los quarks coloreados; se trata de los cuantos de los campos generados por los números cuánticos de color, de la misma forma que el fotón es el cuanto del campo electromagnético. Los gluones pueden considerarse como combinaciones de color y anticolor. Hay nueve combinaciones posibles de tres colores y tres anticolores; de estas combinaciones, seis son inmediatas *(cuadros blancos)* pero tres exigen un tratamiento especial *(cuadros grises)*. Las tres tienen combinaciones de un solo color con el correspondiente anticolor; en cada una de estas combinaciones todos los números cuánticos se cancelan. Estados con números cuánticos nulos pueden combinarse como se quiera, pero únicamente tres de estas combinaciones deben considerarse. Una es $R\bar{R} + G\bar{G} + B\bar{B}$, en la que los números cuánticos son nulos; este caso es trivial y puede desecharse. Las dos restantes son: $R\bar{R} - G\bar{G}$ – y $R\bar{R} + G\bar{G} - 2B\bar{B}$; ambas pueden tratarse como los otros seis pero se necesitan factores numéricos correctivos.

COLORES DE LOS QUARKS (BARIONES)

R G B

ANTICOLORES DE LOS ANTIQUARKS (ANTIBARIONES)

$\bar{R}$ $\bar{G}$ $\bar{B}$

MESONES

R $\bar{R}$

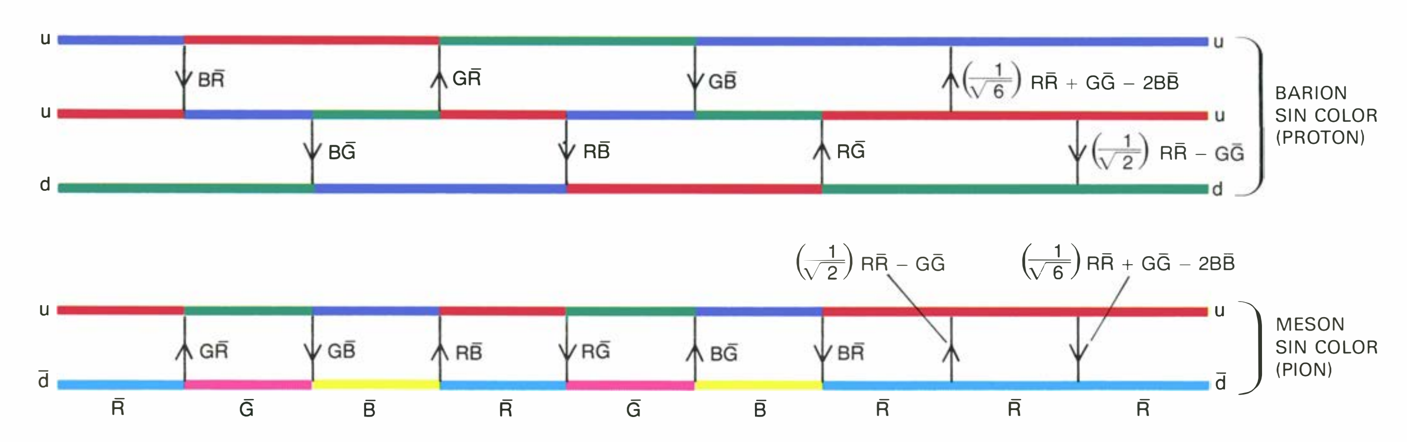
MESONES

G $\bar{G}$

MESONES

B $\bar{B}$

LOS HADRONES SIN COLOR se forman combinando de forma adecuada los quarks coloreados. Un barión está formado por tres quarks, uno rojo, otro verde y el tercero azul. (Los quarks pueden tener cualquier sabor, y sus sabores determinarán todas las propiedades observables de la partícula.) Igualmente, un antibarión está formado por tres antiquarks, uno de cada anticolor. Los anticolores se representan aquí como los complementarios de los correspondientes colores primarios. En los mesones, los colores y anticolores están igualmente representados. En cada una de estas combinaciones el valor neto de los números cuánticos de color es cero; en términos figurativos, los hadrones son blancos o incoloros. Ninguna otra combinación de colores puede dar el mismo resultado. Cabe, pues, explicar por qué únicamente estas combinaciones de quarks se encuentran en la naturaleza, y por qué no pueden existir quarks aislados, una vez postulado que sólo pueden observarse las partículas sin color. El problema del confinamiento de los quarks queda reducido a la pura explicación de este postulado.



EL INTERCAMBIO DE GLUONES es la causa de que los quarks estén ligados dentro de un hadrón y puedan cambiar simultáneamente sus colores. En estos diagramas, la dimensión vertical representa la separación espacial entre los quarks y, la dimensión horizontal, el tiempo. En cada vértice en el que es emitido o absorbido un gluón, deben compensarse los números cuánticos de color. De aquí que en el extremo superior izquierdo, donde un quark azul emite un gluón azul-antirojo, el carácter azulado del quark se lo lleva el gluón, y el quark pasa a rojo, compensando el antirrojo del gluón. Cuando el gluón es absorbido, el antirrojo del gluón y el rojo del quark que absorbe se aniquilan entre sí, y el quark queda de color azul. Los gluones del extremo derecha, que tienen números cuánticos nulos, no cambian los colores de los quarks, y ningún gluón incide en los sabores de los quarks. El barión contiene un quark rojo, otro verde y un tercero azul; en el mesón, el color del quark se compensa por el anticolor del antiquark. En la práctica no se puede determinar los colores de los quarks, sólo cabe calcular la probabilidad de cada color. En los hadrones sin color las probabilidades de los colores son las mismas.

la distinción cualitativa entre quarks y leptones. Un factor importante en la distinción es que los leptones no forman estados fuertemente ligados. Si el número cuántico de color es el responsable de que los quarks se liguen entre sí, entonces se entiende fácilmente la ausencia de ligaduras fuertes entre los leptones, ya que los leptones no tienen color.

Para entender las fuerzas entre los quarks, conviene considerar antes una fuerza más familiar: el electromagnetismo. La fuerza electromagnética viene descrita por la ley de Coulomb, que afirma que la fuerza entre dos cuerpos cargados disminuye como el cuadrado de la distancia entre ellos. Por ejemplo, la fuerza entre un protón en un núcleo atómico y uno de los electrones que están alrededor del núcleo viene descrita por esta ley. La fuerza está transmitida por un campo o por partículas discretas: los fotones, cuantos del campo electromagnético. En última instancia, tanto el campo como la fuerza son producidos por las cargas eléctricas de las partículas; como las cargas son distintas, la fuerza será de atracción.

Las fuerzas entre quarks son en muchos aspectos parecidas, si bien algo más complicadas. En el caso del campo electromagnético sólo un número cuántico (la carga eléctrica) está implicado en la creación del campo; los campos entre los quarks vienen generados por dos números cuánticos: el spin isotópico de color y la hipercarga de color. Para continuar con la analogía con el electromagnetismo, estos números cuánticos pueden considerarse como dos variedades de "carga de color".

Si una combinación de quarks tiene que ser estable, obviamente las fuerzas entre ellos tendrán que ser fuerzas de atracción. Lo cual puede lograrse si los quarks en un barión, por ejemplo, poseen todos colores distintos, ya que así los quarks tendrían distintos los dos valores de la carga de color. Un quark rojo y un quark verde se ligarán porque sus números de spin isotópico de color serán de signos opuestos; el quark azul se ligará con los otros dos porque los números cuánticos de hipercarga de color tienen signos distintos. Un mecanismo similar es el que genera una fuerza atractiva entre un quark de un color y un antiquark del correspondiente anticolor, como en un mesón. Las fuerzas favorecen, por tanto, aquellas combinaciones que se han identificado como blancas o incoloras.

En realidad, la situación es aun más complicada. Mientras la fuerza electromagnética es transmitida por una sola clase de partícula, el fotón, la fuerza asociada con los colores de los quarks exige ocho campos y ocho partículas intermediarias. Estas partículas reciben el nombre de gluones porque aglutinan ("glue") los quarks. Como el fotón, todos ellos tienen masa nula y spin 1; como los quarks, nunca han sido detectados como partículas libres.

Se puede considerar que los ocho gluones tienen colores compuestos, obtenidos mediante combinaciones de los tres colores y de los tres anticolores. Hay un total de nueve combinaciones de este tipo, pero una de ellas recibe contribuciones iguales del rojo combinado con el antirrojo, el verde con el antiverde y el azul combinado con el antiazul. Como esta combinación no tiene color es un caso trivial y se excluye, quedando por tanto ocho gluones coloreados.

Los quarks interaccionan mediante el intercambio de gluones; al hacerlo, pueden cambiar sus colores pero no sus sabores. Un barión contiene siempre quarks rojos, verdes y azules, pero como los gluones son intercambiados continuamente, es imposible en un cierto instante decir qué quark tiene qué color. Igualmente, un mesón consta siempre de un quark de un color y un antiquark del anticolor complementario, pero las tres posibles combinaciones de color y anticolor están representadas por un igual. En mecánica cuántica no tenemos conocimiento cierto de los colores de los quarks; en realidad, solamente podemos conocer la probabilidad de que un quark tenga un cierto color. Si todos los hadrones carecen de color, las probabilidades para los tres colores serán iguales.

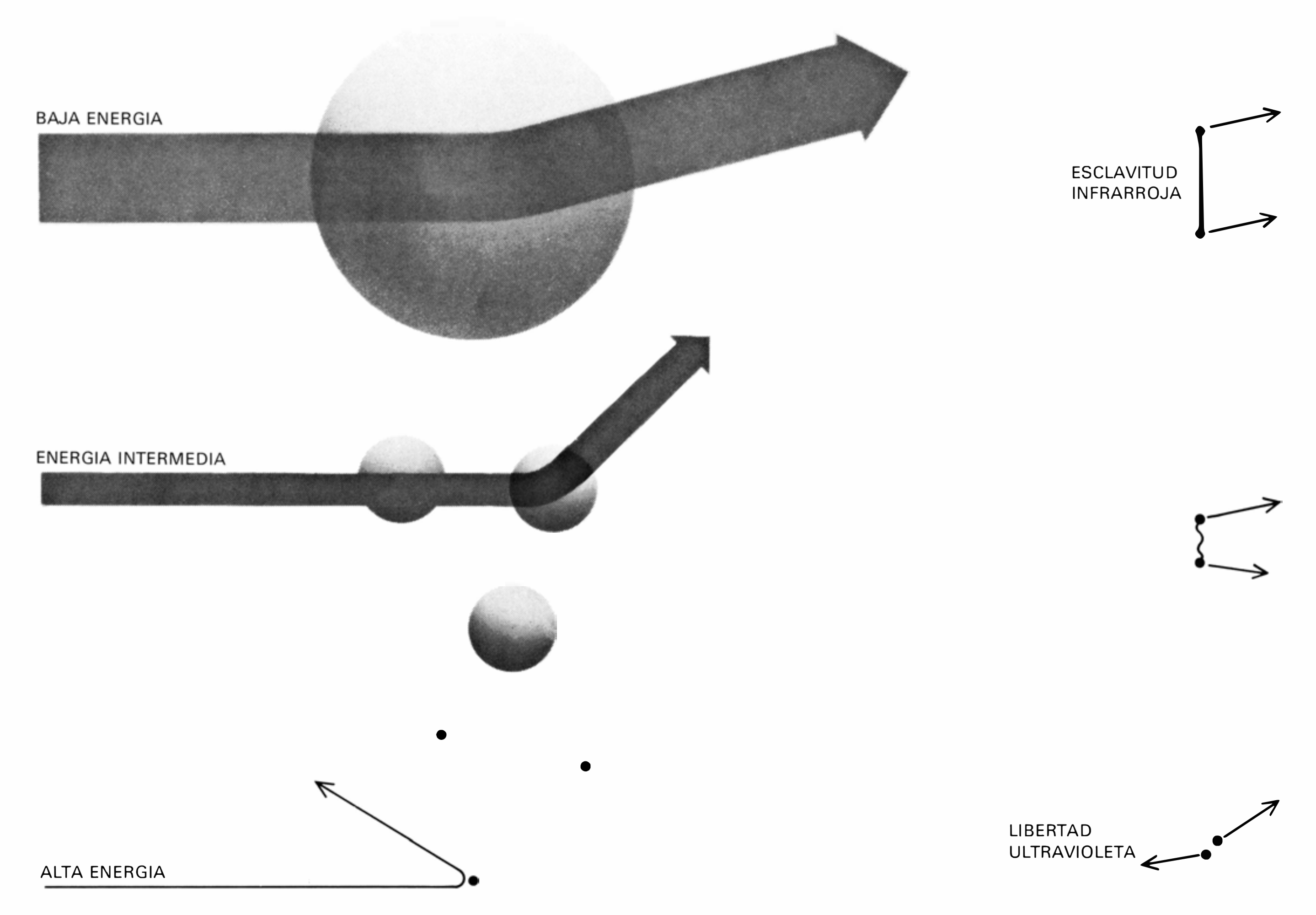
El modelo de hadrones, según el cual estas partículas se hallan compuestas de quarks ligados por el intercambio de gluones, admite una formulación matemática atractiva. El modelo es un ejemplo de una teoría gauge no-abeliana, que es una clase de teoría inventada por C. N. Yang, de la Universidad estatal de Nueva York, en Stony Brook, y por Robert L. Mills, de la Universidad estatal de Ohio. Una teoría gauge es la que está inspirada en la teoría del electromagnetismo desarrollada por James Clerk Maxwell. Característica de todas estas teorías es que cualquier partícula con un cierto número cuántico, o carga, genera un campo de largo alcance cuya intensidad es proporcional al número cuántico. En la teoría de Maxwell el número cuántico en cuestión es la carga eléctrica; en el modelo de la estructura de las hadrones hay dos de estos números cuánticos, que son los asociados con los colores de los quarks.

La teoría de Maxwell es una teoría gauge abeliana; las teorías gauge no-abelianas se caracterizan porque los propios campos llevan números cuánticos. Un campo puede por tanto actuar como su propia fuente. La teoría de Einstein de la gravitación es también una teoría gauge no-abeliana en la que el propio campo gravitacional genera la gravedad. El electromagnetismo y las interacciones débiles, que son responsables de una clase de desintegraciones radiactivas, se han visto combinadas recientemente en otra teoría gauge no-abeliana en los trabajos de Steven Weinberg, de la Universidad de Harvard, y de Abdus Salam, del centro internacional de Física Teórica, de Trieste. El modelo con quarks coloreados podría darnos un marco análogo para entender las interacciones fuentes. Estas cuatro fuerzas –fuertes, débiles, electromagnéticas y gravitacionales– son las únicas que conocemos. Sería de desear que las cuatro pudieran entenderse con el mismo tipo de teoría.

Antes de describir los esquemas de confinamiento de los quarks es conveniente considerar la posibilidad de que no estén confinados. Quizás están ahí pero no hemos sido capaces de detectar su presencia, o quizás los hemos confundido con alguna partícula ordinaria. Si un quark con carga fraccionaria puede escaparse de un hadrón, es casi seguro que sería estable al encontrarse aislado. Un quark puede desintegrarse dando otro quark, pero al menos una de las especies de quarks –la de menor masa– tendría que ser estable. No podría desintegrarse ya que todas las partículas, salvo los quarks, tienen cargas enteras, que no pueden surgir de la desintegración de un quark con carga fraccionaria.

Estos quarks estables y libres podrían muy bien quedar entre los átomos de materia ordinaria. Igualmente, si pueden escapar, deberían encontrarse entre los productos residuales de colisiones de hadrones a altas energías, tanto en los aceleradores de partículas como cuando los rayos cósmicos chocan con los átomos de la atmósfera. El argumento principal contra la existencia de quarks libres es que no han sido hallados en materia ordinaria, ni siquiera en concentraciones mínimas, ni tampoco se han encontrado como residuos de colisiones de hadrones.

Si existieran quarks con carga fraccionaria, se les detectaría y reconocería fácilmente. Las partículas cargadas se detectan por la ionización que causan en los átomos del medio. La cantidad de ionización es proporcional al cuadrado



LA ESCLAVITUD DE INFRARROJO, que es una explicación propuesta para el confinamiento de los quarks, es un concepto deducido directamente de la teoría de campos que describe las interacciones entre los quarks coloreados y los gluones. La teoría afirma que los quarks muy separados (alrededor del tamaño de un hadrón, 10^{-13} centímetros) están muy ligados los unos con los otros y se mueve como un todo. El comportamiento de los quarks a grandes distancias se estudia haciendo chocar partículas de prueba de baja energía con los hadrones; se descubre que, a estas energías, el hadrón aparece como un cuerpo unificado y coherente. Por otra parte, cuando los quarks están cerca los unos de los otros, se hallan muy débilmente unidos y pueden moverse de forma independiente. A estas distancias, las fuerzas entre los quarks se estudian con partículas de prueba de altas energías, y se han observado centros de masa en el hadrón que parecen moverse libremente. Las expresiones esclavitud de infrarrojo y libertad ultravioleta se usan para esos sucesos por analogía con las energías de la radiación infrarroja y ultravioleta.

de la carga eléctrica de la partícula. Un quark de carga 1/3 produciría una ionización que sería un noveno de la producida por una partícula de carga 1, pudiéndose distinguir sin dificultad de las partículas ordinarias.

Pero también puede ocurrir que los quarks no tengan cargas fraccionarias. Con la adición del color a la teoría quark se hace factible asignar a cada quark valores enteros, tanto por lo que respecta a la carga eléctrica como en lo que respecta al número bariónico; Han y yo propusimos un modelo de este tipo en 1965. El modelo tiene el efecto de hacer visible el color, en el sentido que los quarks de distintos colores tienen distintas masas, cargas eléctricas y números bariónicos y por lo tanto se los puede diferenciar. Por cada sabor de quark, toda la carga eléctrica (+1 o −1) se asignaría a un color, y los otros dos colores tendrían carga cero. Si todos los colores deben estar representados por un igual, entonces la carga total de los hadrones sería la correcta. Si los quarks tienen cargas enteras, entonces un quark libre en un laboratorio no aparecería como muy distinto de un barión ordinario, y fácilmente podría haberse confundido. No hay que desechar absolutamente tal posibilidad.

Otra hipótesis pone de manifiesto que, aunque es difícil extraer un quark de los hadrones, no resulta imposible. Quizás se trata de partículas de gran masa y los aceleradores de que disponemos hoy día carecen de la potencia suficiente para liberarlos. Esta hipótesis requiere, sin embargo, que la masa de un quark libre y la de un quark ligado varíen mucho. En efecto, un quark solitario puede alcanzar una masa mayor que la de un barión formado por tres quarks; lo cual resulta difícil de entender, si no incomprensible.

La teoría del color de la construcción de los hadrones conduce de forma natural a un confinamiento, parcial al menos, de los quarks. Un átomo encuentra su estado más estable cuando es eléctricamente neutro, esto es, cuando ha atraído el número exacto de electrones necesarios para compensar la carga positiva del núcleo. Cualquier intento por añadir un electrón adicional, o arrancar uno de los ya ligados, encuentra resistencia. De igual modo, un sistema de quarks se halla en su estado más estable cuando están presentes, a la vez, los tres colores, o un color y un anticolor; entonces el hadrón es neutro con relación a las dos clases de carga de color. Este resultado no es sorprendente en absoluto; los números cuánticos de color fueron introducidos precisamente para obtener una representación igual de los colores en los bariones. Síguese que, puesto que un quark solitario es necesariamente una partícu-

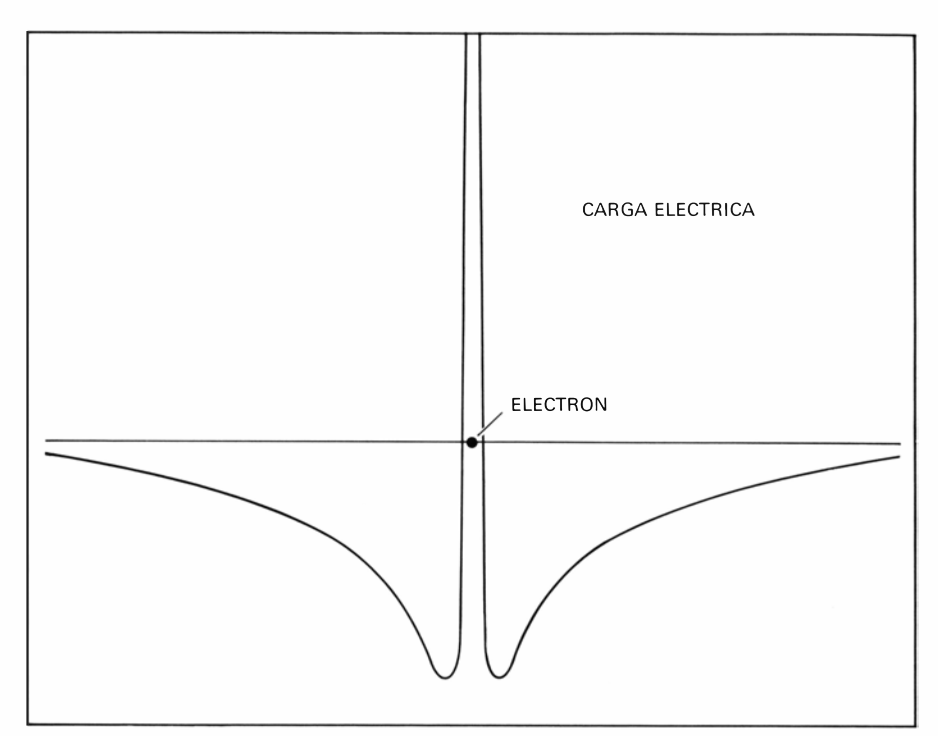
la coloreada, nos encontramos con una configuración energéticamente desfavorable. Los quarks libres tenderán a asociarse para formar hadrones sin color, e igualmente, los electrones libres y los átomos ionizados tenderán a recombinarse. Este aspecto de los colores de los quarks no excluye la posibilidad de que existan quarks libres, pero inhibe fuertemente su formación. Exige que un quark libre o cualquier otro estado coloreado sea menos estable, o de mayor masa, que los estados sin color.

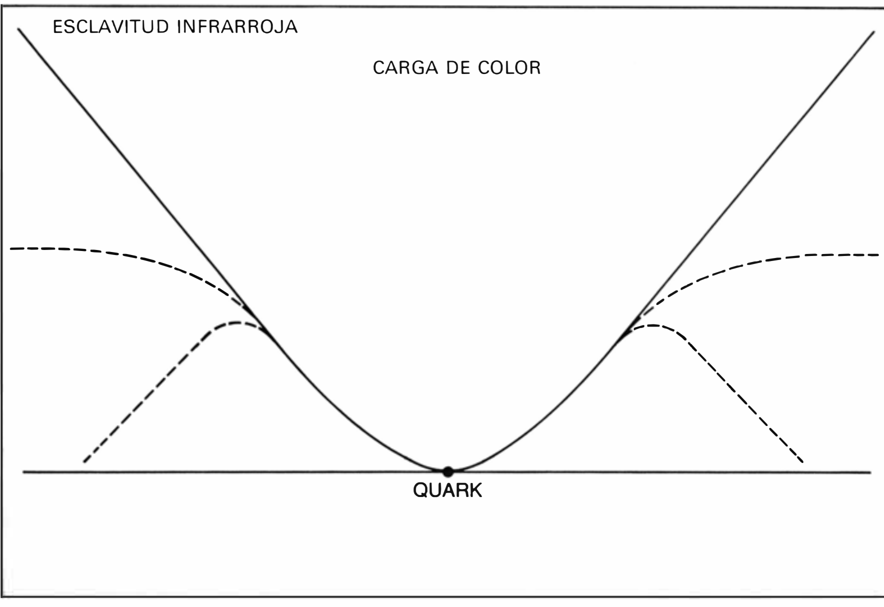
El modelo quark ha cambiado significativamente y ha sufrido progresivas elaboraciones desde que fuera propuesto en 1963. Hay muchas razones para suponer que seguirá evolucionando, y hasta es verosímil que la necesidad que se siente ahora de explicar el confinamiento de los quarks quede alterada por nuevos hechos, entre los que cabe contar la posibilidad de descubrir un quark libre. Mientras tanto, la búsqueda experimental de los quarks, guiada por hipótesis razonables en torno a sus propiedades, no ha sido capaz de probar su existencia. Los concordantes resultados negativos piden una explicación. Y, así, una manera de enfocarlo es postular un mecanismo que confine permanentemente los quarks en el interior de los hadrones; de esta forma los quarks libres no sólo son poco interesantes sino que son absolutamente prohibidos. Hay varias teorías que pueden suministrar este tipo de mecanismo, algunas de las cuales presentan una ingenuidad extraordinaria.

Una de estas ideas surge directamente de la teoría gauge de las interacciones entre los quarks coloreados. De nuevo, el principio puede ilustrarse eficazmente considerando el fenómeno análogo que se observa en las interacciones electromagnéticas de la materia.

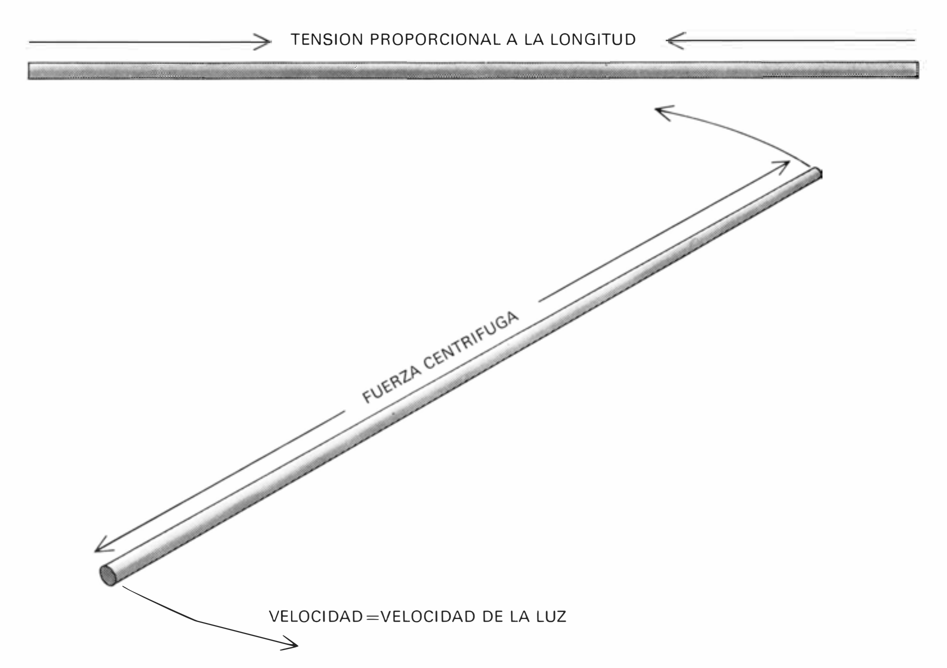
La fórmula del inverso del cuadrado de la distancia de la ley de Coulomb ha sido comprobada con gran precisión para distancias grandes, pero no es válida cuando la fuerza entre las partículas cargadas, tales como los electrones, se mide a distancias extraordinariamente pequeñas. La discrepancia se debe a la distribución espacial de la carga del electrón. En el interior del electrón hay una carga negativa, llamada la carga desnuda, de gran tamaño; pudiera ser muy bien infinita. Esta carga induce en el vacío que la rodea un halo de carga positiva, que casi cancela la carga desnuda. La carga efectiva del electrón, cuando se mide desde una cierta distancia, es simplemente la diferencia entre estas dos cargas. Una partícula de prueba que pudiera aproximarse mucho al electrón penetraría la pantalla de carga positiva y empezaría a notar la gran carga desnuda.

Recordemos que el electromagnetismo es una teoría gauge abeliana, mientras que la teoría de los quarks coloreados de las interacciones fuertes es no-abeliana. Aquí, tal distinción resulta crucial, según han demostrado H. David Politzer, de Harvard, y David Gross y Frank Wilczek, de la Universidad de Princeton. En una teoría no-abeliana, la carga desnuda

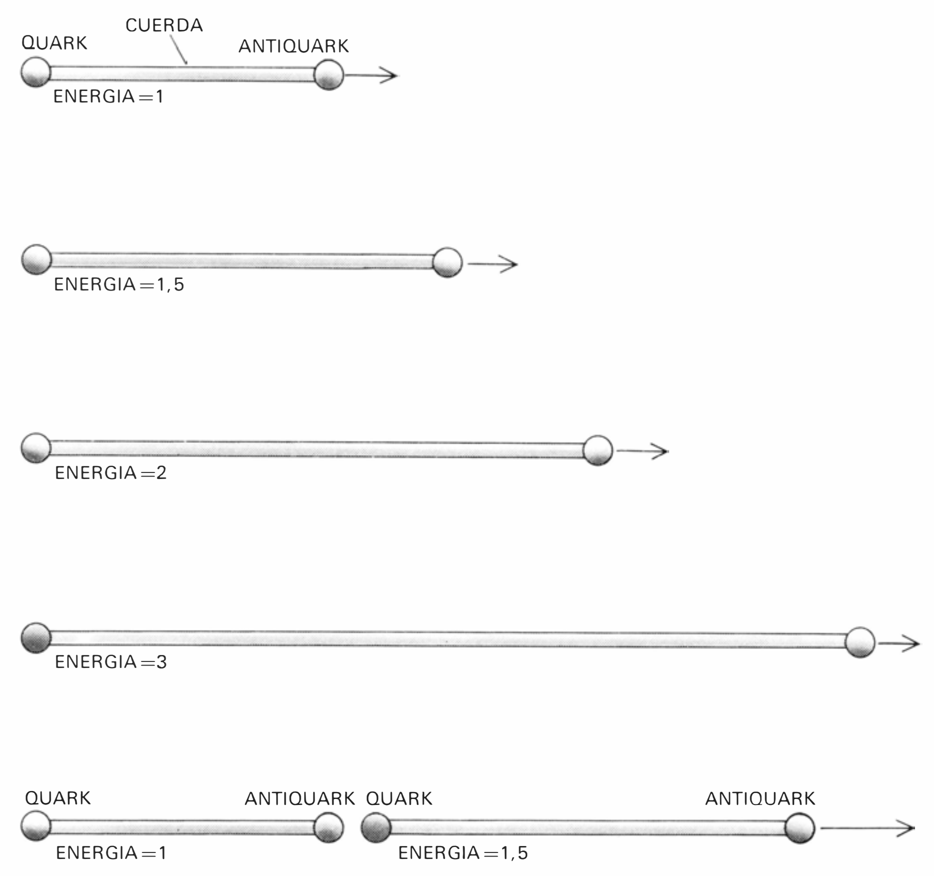




LA DISTRIBUCION DE LA CARGA DE COLOR puede explicar los efectos de la esclavitud de infrarrojo y de la libertad ultravioleta. La distribución parece ser muy distinta de la que nos es familiar a propósito de la carga eléctrica. El electrón tiene en su núcleo una carga negativa grande y posiblemente infinita, llamada la carga desnuda, que induce en el vacío que la rodea una carga positiva de casi la misma magnitud; la carga efectiva del electrón observado desde una cierta distancia es la diferencia entre estas dos cargas. En contraste, se cree que la carga desnuda de color es muy pequeña, posiblemente cero, pero induce una carga a su alrededor de la misma polaridad, de forma que la carga efectiva aumenta, quizás sin límite, cuando se desparrama hacia el espacio. De estas distribuciones de carga se deduce que las partículas cargadas eléctricamente obedecen la ley de Coulomb: la fuerza entre ellas disminuye con el cuadrado de la distancia. Partículas que tengan una carga de color obedecen, por otra parte, una ley muy distinta: la fuerza entre ellas permanece constante, independientemente de la distancia, y la energía que liga las unas con las otras (o la energía que debe suministrarse para separarlas) aumenta con la distancia. La distribución real de la carga de color se puede continuar de distintas formas posibles *(líneas a trazos)*.



EL MODELO DE LA CUERDA para describir la estructura de un hadrón da otra explicación posible del confinamiento de los quarks. El modelo supone que un hadrón está formado de una cuerda unidimensional, sin masa, una de cuyas propiedades intrínsecas es la tensión constante por unidad de longitud. A causa de esta tensión, la cuerda es proclive al colapso; pero puede mantenerse en equilibrio por la fuerza centrífuga, si se le permite girar de modo que sus extremos se muevan, exactamente, a la velocidad de la luz. Estas propiedades de la cuerda implican que su energía es proporcional a su longitud y que su momento angular es proporcional al cuadrado de su energía; relación que se ha podido confirmar para los hadrones.



LOS QUARKS SOLDADOS A CUERDAS pueden hallarse confinados. Para separar los quarks hay que tensar la cuerda; ahora bien, como la energía de la cuerda es proporcional a su longitud, la energía necesaria para separar los quarks aumenta en proporción a la separación. Una separación macroscópica podría obtenerse únicamente a un costo de una energía enorme. Tal vez, resulte imposible aislar, en realidad, un quark independientemente de la energía, puesto que, tan pronto como se haya suministrado energía suficiente para crear un quark y un antiquark, la cuerda puede romperse y estas nuevas partículas ligarse a los extremos. De lo que resulta, no la liberación de un quark, sino la creación de un mesón.

no induce una carga de apantallamiento sino una carga de "antiapantallamiento". Por consiguiente, un quark con una carga de color induce a su alrededor cargas adicionales de la misma polaridad. Como resultado, la carga de color del quark es menor a pequeñas distancias; conforme la partícula se va alejando del quark su carga se va haciendo mayor. La ley de la fuerza correspondiente es totalmente distinta de la ley de Coulomb: cuando la distancia que separa dos partículas con carga de color aumenta, la fuerza entre ellas permanece constante o incluso podría aumentar.

Una partícula de prueba que choca con un hadrón a alta energía inspecciona el comportamiento de los quarks constituyentes a distancias muy pequeñas y durante intervalos de tiempo muy cortos. Este hecho se funda matemáticamente en el principio de incertidumbre, que relaciona el tiempo y la distancia en que se realiza una medición con la energía y el momento de la partícula de prueba. Puede entenderse intuitivamente recordando que una partícula de alta energía se mueve casi a la velocidad de la luz y que "ve" los quarks durante un breve instante, durante el cual pueden desplazarse a corta distancia. La teoría gauge no-abeliana predice que esta partícula de prueba de alta energía revelará los quarks como partículas esencialmente libres, moviéndose independientemente unas de otras, ya que, a breves distancias, la carga de color disminuye y los quarks se encuentran sólo débilmente ligados. Por otra parte, una investigación a bajas energías de un hadrón encontraría los quarks ligados rígidamente y moviéndose como un todo. A estas energías proporcionalmente bajas, los quarks se observan por un intervalo de tiempo mayor y pueden interaccionar a grandes distancias. De aquí que los efectos más poderosos, de largo alcance, de los campos de gauge de color actúen sobre los quarks y liguen unos con otros.

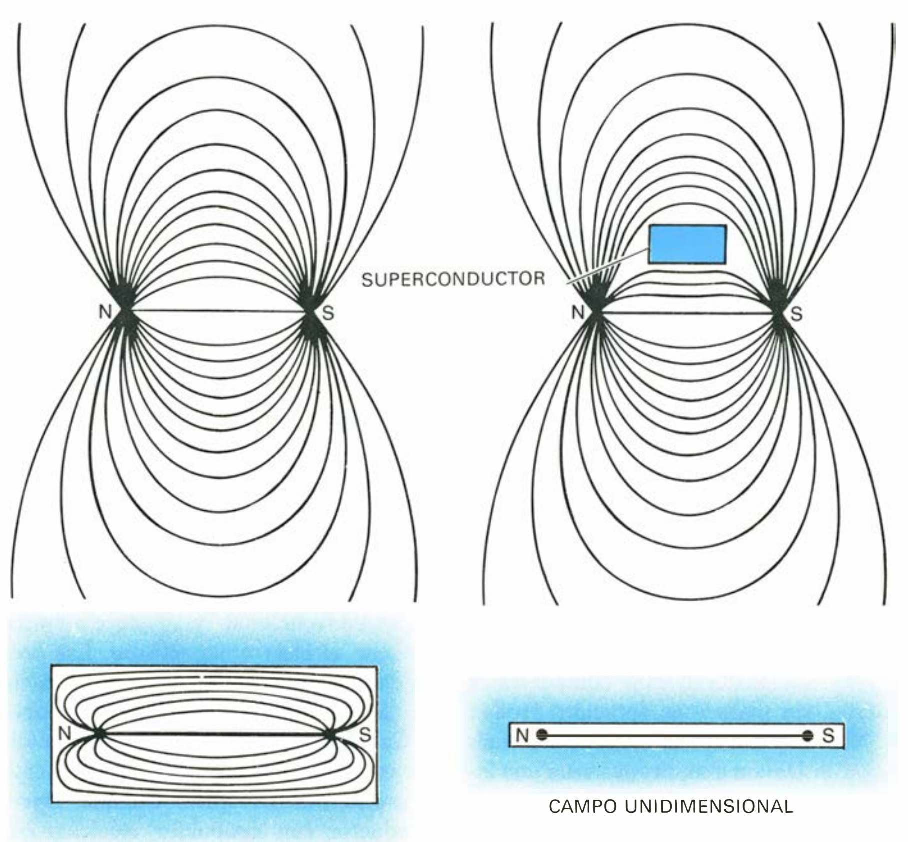
Puesto que la teoría es no-abeliana, los gluones están sujetos a las mismas ligaduras que los quarks, y se hallan confinados con igual eficiencia. Los gluones, o los campos que ellos representan, generan sus propios campos, que tienen las mismas características que los campos de color de los quarks. El comportamiento que resulta para los gluones contrasta extraordinariamente con el de los fotones, los cuantos de los campos gauge de la teoría abeliana del electromagnetismo. Los fotones no generan ningún campo electromagnético, y escapan de ese campo sin ningún impedimento.

Estos dos aspectos opuestos de la teo-

ría gauge del color han recibido los pintorescos nombres de esclavitud infrarroja y libertad ultravioleta. El nombre no se refiere a estas regiones particulares del espectro electromagnético, sino que simplemente sugieren fenómenos de baja-energía y alta-energía, respectivamente. La libertad ultravioleta se conoce también con el nombre de libertad asintótica, pues el estado de un movimiento completamente independiente sólo es asintóticamente aproximado, nunca realmente alcanzado. Este efecto pudo observarse en las colisiones de electrones con protones, en las cuales se ha hallado que, a energías muy altas, el protón se comporta como si fuera una colección de quarks libres.

El concepto de esclavitud infrarroja nos ofrece una clave muy clara para explicar el confinamiento de los quarks. Si la carga de color efectiva contínua aumentando indefinidamente conforme va creciendo la distancia, entonces sucede lo mismo con la energía necesaria para separar dos quarks. Alcanzar una separación macroscópica exigiría un enorme consumo de energía y sería, a buen seguro, prácticamente imposible.

No se conoce, sin embargo, la distribución espacial de la carga de color a distancias macroscópicas; en realidad, no se sabe nada para cualquier distancia que supere el tamaño aproximado de un hadrón; esto es, los 10^{-13} centímetros. Si la esclavitud infrarroja puede o no explicar el confinamiento de los quarks depende de los detalles de la distribución de carga. Hay que puntualizar que no es necesario que la carga aumente indefinidamente para atrapar los quarks de forma permanente. Sólo se requiere que aumente hasta el punto en que la energía necesaria para separarlos más sea igual a la energía necesaria para crear un par quark-antiquark. Cuando se alcanza esa energía, se puede materializar un par quark-antiquark. El quark que se acaba de crear reemplaza al extraído, y el antiquark se liga con el quark desplazado, formando un mesón. Resulta, pues, que se saca un quark de un hadrón pero no queda libre; todo lo que podemos observar es la creación de un mesón.



LA GEOMETRIA DE LA CUERDA puede explicarse mediante una analogía con el comportamiento de un campo magnético en la vecindad de un superconductor. La intensidad de un campo magnético disminuye con el cuadrado de la distancia porque las líneas de fuerza se desparraman en el espacio tridimensional. Las líneas de flujo son expulsadas por un superconductor y, si dos polos magnéticos están rodeados por un medio superconductor, el campo queda confinado en un tubo delgado. Bajo estas condiciones, la fuerza entre los polos es constante y la energía necesaria para separarlos aumenta linealmente con la distancia. Una cuerda puede ser un campo similar unidimensional, confinado no por un medio superconductor sino por el vacío. El confinamiento de los quarks podría explicarse incluso si la carga de color no aumentara con la distancia y obedeciera a una ley análoga a la de la carga eléctrica.

Una clase de carga que aumenta con la distancia y una fuerza que permanece constante al aumentar aquélla, parecen contradecir la noción intuitiva de cómo debe comportarse la materia. La mecánica cuántica había contradicho ya la intuición, y no pidió disculpas; pero, en este caso, una explicación, e incluso una imagen intuitiva, de cómo pueden originarse estos efectos quizás sea posible. La explicación pertenece a otro modelo de confinamiento de los quarks, el llamado modelo de la cuerda.

El modelo de la cuerda surgió de las fórmulas matemáticas introducidas por Gabriele Veneziano, del Weizmann Institute of Science. En este modelo, se considera a los hadrones como cuerdas flexibles y extensibles en rápida rotación. La cuerda carece de masa, al menos no tiene "cuentas" materiales a lo largo de ella, aunque sí tiene energía cinética y potencial. Entre las propiedades intrínsecas asignadas a la cuerda está la de una cierta tensión fija, de forma que los extremos de la cuerda tienden el uno hacia el otro con una fuerza constante. La tensión representa la energía potencial (como ocurre con la tensión de un muelle extendido) y el tamaño de esta energía resulta exactamente proporcional a la longitud de la cuerda. Si la cuerda fuera estacionaria, su tensión intrínseca produciría su colapso, pero puede mantenerse el sistema en equilibrio girando la cuerda. Conforme la cuerda va girando, se va alargando; cuando su longitud es tal que sus extremos se mueven con la velocidad de la luz, la fuerza centrífuga compensa la tensión (los extremos se pueden mover con la velocidad de la luz, y tiene que ser realmente así ya que carecen de masa).

Dadas las relaciones entre longitud, energía y rotación que han sido introducidas en la cuerda, el momento angular del sistema es proporcional al cuadrado de su energía total. Con esto, el modelo refleja una importante propiedad que ha sido observada en las hadrones: cuando se presenta el momento angular de los hadrones como función del cuadrado de su masa o energía, resulta una serie de líneas paralelas, llamadas trayectorias de Regge, en honor del físico italiano Tullio Regge. La relación entre el momento angular y la energía incorporada en el modelo de la cuerda da una explicación posible de por qué todas las trayectorias de Regge han de ser líneas rectas.

Los quarks pueden incorporarse en el modelo de la cuerda colocándolos, simplemente, en los extremos de las cuerdas. Se supone que los quarks comportan los números cuánticos del hadrón, mientras que la cuerda comporta la mayor parte

de la energía y el momento. El confinamiento de los quarks es una consecuencia natural de las propiedades de la cuerda. Se cree que los quarks no pueden ser arrancados, y, por tanto, la única forma de separarlos será tensando la cuerda. Ahora bien, cualquier alargamiento de la longitud de la cuerda exige un aumento proporcional de su energía; por tanto, una vez más resultan imposibles las grandes separaciones. Pero aunque la cuerda no pueda ser alargada sin un consumo de energía desordenado, sí puede partirse en dos. Un par quark-antiquark, recién creado, quedaría soldado por el punto de rotura a los nuevos extremos, originándose un mesón. En todas estas interacciones se puede ver que el modelo de la cuerda da resultados equivalentes a la hipótesis de la esclavitud infrarroja, aunque la descripción subyacente del hadrón tiene una forma muy distinta.

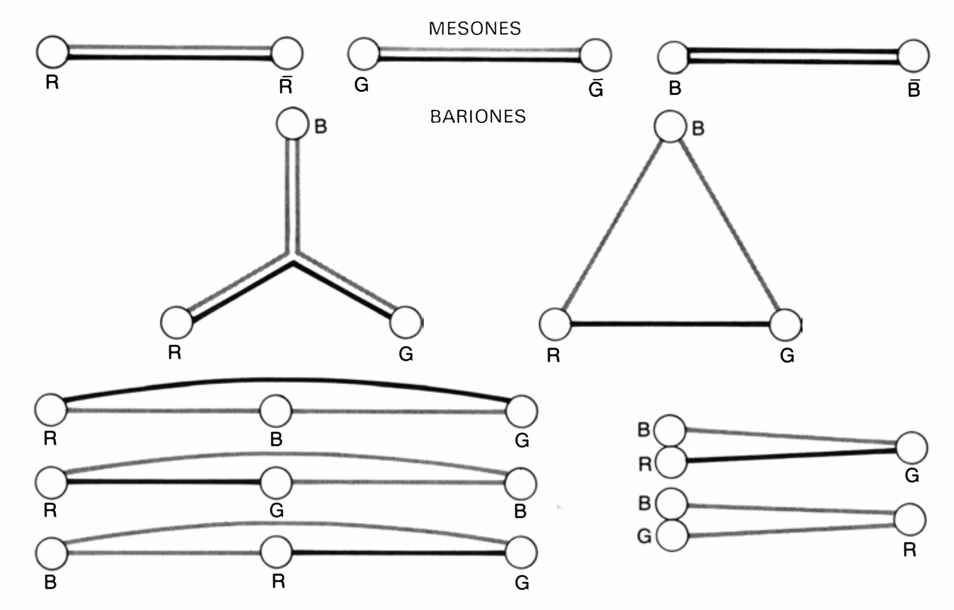
¿De qué material está compuesta la cuerda, sin masa y en rotación? Holger B. Nielsen y L. Olesen, del Instituto Niels Bohr de Dinamarca, propusieron una interpretación sugestiva; para explicarla, hemos de recurrir al electromagnetismo. La ley de Coulomb describe un campo electromagnético en un espacio tridimensional; si el campo se representa mediante líneas discretas de fuerza la intensidad del campo decrece con la distancia, porque las líneas se desparraman en el espacio. Su densidad disminuye con el cuadrado de la distancia, cumpliendo la ley de fuerzas. Si todas las líneas de fuerza se pudieran comprimir en un tubo delgado, las líneas no se desparramarían y la fuerza permanecería constante, independientemente de la distancia.

La geometría característica de la cuerda sugiere que pueda considerarse un campo gauge unidimensional. Las propiedades de la propia cuerda –en particular, la fuerza de tensión inherente y la variación de la energía con la longitud– quedan entonces determinadas en la forma predicha por el modelo. Más aun, las extrañas propiedades de los campos gauge de color se explican así de una forma simple e intuitiva muy atrayente. Ya no es la fuerza la que es rara; la fuerza es convencional, y obedece idéntica ley que el electromagnetismo. Las propiedades peculiares son consecuencia de la geometría impuesta al campo.

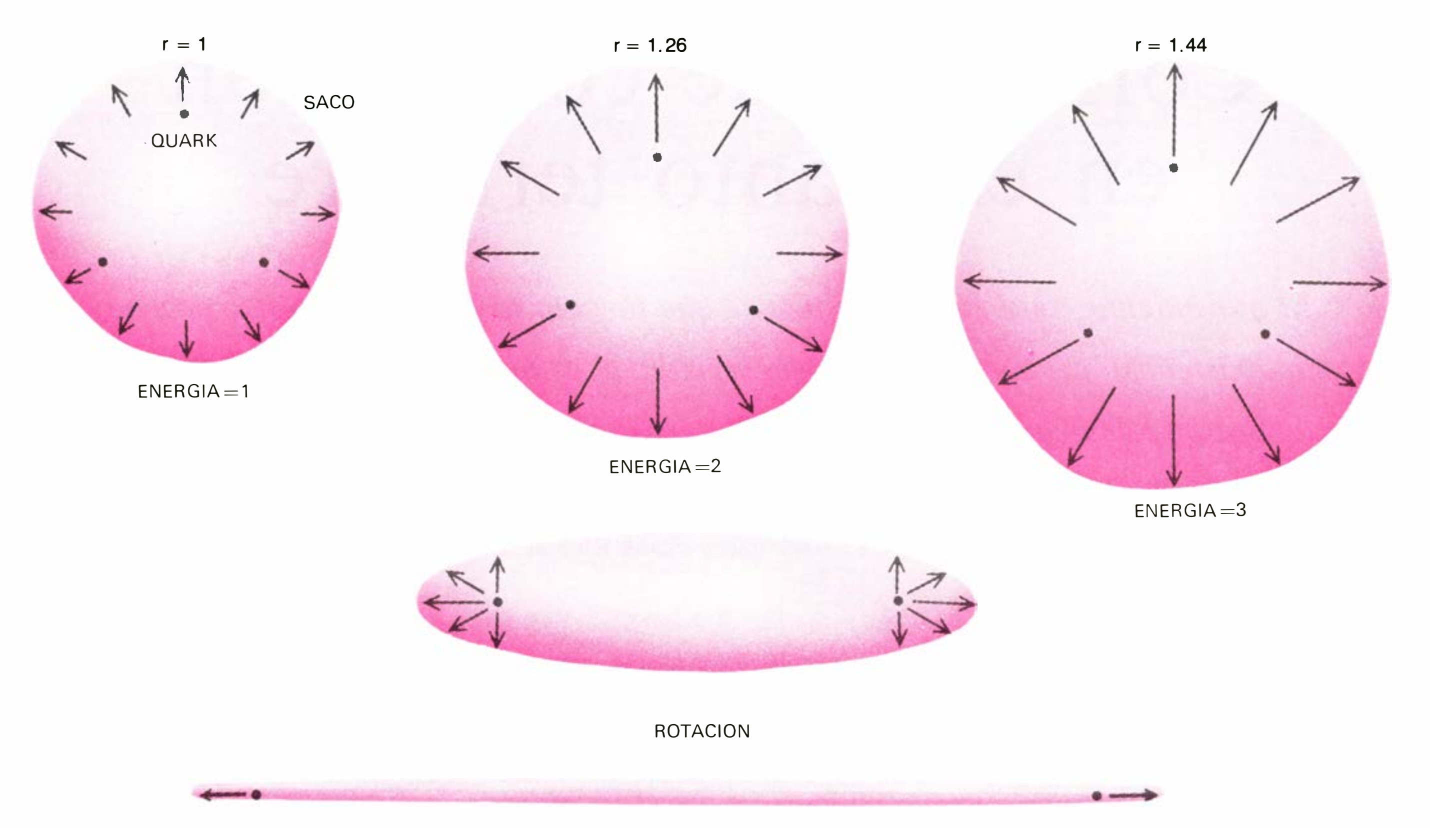
Campos que son virtualmente unidimensionales pueden crearse realmente a escala macroscópica. Cuando superconductor (un conductor eléctrico enfriado hasta alcanzar el estado superconductor) se coloca en un campo magnético, las líneas de fuerza son expulsadas del medio superconductor. Si los dos polos de un imán están totalmente sumergidos en un superconductor, las líneas de fuerza quedan confinadas a un delgado tubo entre los polos, donde se destruye la superconductividad. El tubo de líneas de flujo tiene una cantidad fija de energía magnética por unidad de longitud y la cantidad de flujo magnético está cuantificada. Una analogía exacta exige sólo que supongamos que los efectos del medio superconductor sobre el campo magnético se dupliquen en los efectos del vacío sobre el campo gauge de color. Basada en esta descripción existe una teoría formulada matemáticamente; en ella, se considera a los quarks como los supuestos portadores de la carga magnética, es decir, monopolos magnéticos.

La cuerda es un modelo original y divertido de estructura hadrónica, pero los intentos por convertirla en una teoría completa y cuantitativa han topado con dificultades. El colocar los quarks en los extremos de la cuerda es arbitrario. Esto no origina problemas importantes en el caso del mesón, que puede considerarse como un único trozo de cuerda con un quark y un antiquark en sus extremos, pero no es nada clara la estructura que debe asignarse a un barión. Hay varias configuraciones posibles, tales como una estrella de tres puntos, o un triángulo con un quark en cada vértice. La relación entre la masa o energía y el momento angular es análoga para bariones y mesones (esto es, sus trayectorias de Regge son casi paralelas), lo que implica que la dinámica interna de los dos tipos de partículas es también similar. Esta observación favorece otra posible estructura bariónica: una única cuerda con un quark en un extremo y dos quarks en el otro extremo. En este modelo, sin embargo, los colores pueden asociarse a los quarks de tres formas distintas, que no son equivalentes entre sí. Quizás el barión resuena entre estas configuraciones, de la misma forma que el anillo de benceno resuena entre sus estructuras distintas posibles.

Los números cuánticos de spin isotópico de color y de hipercarga de color pueden acomodarse en el modelo de cuerda, suponiendo que hay dos clases de cuerdas, cada una de ellas transportando el campo asociado con uno de los números cuánticos. Sin embargo, en conjunto hay ocho campos de gauge, representados por sus ocho combinaciones de color-anticolor de los gluones. ¿Hay también ocho clases de cuerdas? ¿Cómo se describen los cambios de color de los quarks debidos a la emisión o absorción de un gluón? Estas preguntas no han recibido todavía una contestación satisfactoria. Tal vez, el carácter intuitivo y simple del modelo de la cuerda sea de-



LA CONFIGURACION DE LAS CUERDAS que unen los quarks no es siempre evidente y representa un serio problema para los futuros desarrollos del modelo de la cuerda. Conviene considerar dos clases de cuerda, asociada cada una con los números cuánticos de color, spin isotópico de color *(negro)* e hipercarga de color *(gris)*, respectivamente. El ligar un quark y un antiquark, para formar un mesón, con estas cuerdas es inmediato; los bariones, sin embargo, requieren una estructura más compleja, para la que hay varias alternativas. El barión puede resonar entre las distintas estructuras posibles, pero no todas ellas son satisfactorias. Los quarks deben poder intercambiar sus colores sin alterar la masa o las otras propiedades del hadrón, pero esta condición no se satisface invariablemente. Más aún, los colores de los quarks dan origen a ocho campos, asociados con los ocho gluones, en lugar de dos, y no hay manera inmediata de incorporarlo todo ello en el modelo.



EL MODELO DEL SACO DE LA ESTRUCTURA de los hadrones proporciona un tercer mecanismo para confinar los quarks. En este modelo, el confinamiento es en realidad una hipótesis de partida: se supone que los quarks están atrapados dentro de un saco cuya superficie no pueden atravesar. El saco se mantiene hinchado gracias a la presión de los quarks en su interior, de la misma forma que un balón está hinchado por la presión del gas de su interior. Los quarks pueden separarse únicamente hinchando más el saco. Sin embargo, la energía del saco es proporcional a su volumen, de forma que cada aumento de la separación entre los quarks exige una aplicación adicional de energía. La conexión se pone de manifiesto cuando el saco gira rápidamente; se alarga entonces para formar un objeto que no puede distinguirse de una cuerda.

masiado ingenuo para un sistema en el que los efectos mecánico-cuánticos son esenciales.

El tercer intento importante de explicar el confinamiento de los quarks sigue un método algo distinto para alcanzar conclusiones parecidas. Este modelo ha sido propuesto por Kenneth A. Johnson, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y otros. Toma como una de las condiciones iniciales que los quarks estén confinados; a partir de esta hipótesis, intenta calcular las propiedades conocidas de los hadrones.

Para lograr el confinamiento, el modelo emplea la estratagema que tal vez sea la más obvia: los quarks se hallan encerrados dentro de un saco o burbuja. Característica de dicho modelo es que los quarks no pueden atravesar la textura del saco, pero ejerciendo presión desde su interior lo pueden hinchar. Ahora bien, la energía del propio saco es proporcional a su volumen, de forma que resultan necesarias cantidades ilimitadamente grandes de energía para separar los quarks. El sistema alcanza el equilibrio cuando la tendencia del saco a encogerse queda compensada por la presión de los quarks en el interior, que se mueven libremente como las moléculas de un gas. Las interacciones de los quarks dentro del saco vienen determinadas por la teoría gauge no-abeliana usual.

A partir del modelo del saco se pueden calcular, con bastante precisión, varias propiedades del protón y del neutrón y de otros hadrones. El modelo no es muy distinto teóricamente de la descripción de la cuerda de Nielsen-Olensen. En un caso, la relación crítica se da entre longitud y energía; en el otro, es entre volumen y energía; pero el efecto es el mismo. El saco puede considerarse como una cuerda tan gruesa cuan larga. Inversamente, si un saco esférico se gira con suficiente rapidez, se alarga, esto es, se convierte en una cuerda. Quizás se demostrará que el saco es apropiado para analizar el estado fundamental de los hadrones y que la cuerda sea adecuada a sus estados de excitación y rotación.

Cada uno de estos tres modelos cumple su objetivo de suministrar un mecanismo que confine a los quarks dentro de los hadrones. Por separado, todos los modelos explican algunas propiedades de los hadrones, pero ninguno puede tomarse por definitivo. Quizás la teoría final combinará características de distintos modelos; por ejemplo, sería útil tener el concepto de libertad ultravioleta en los modelos de cuerda.

Un paso hacia esa síntesis fue el intentado por Kenneth G. Wilson, de la Universidad de Cornell. En el modelo de Wilson, el espacio-tiempo continuo del mundo real se aproxima por una red en el que las celdas tienen el tamaño de un hadrón. Los quarks pueden ocupar cualquiera de los lugares de la red, y los campos gluónicos de color se propagan a lo largo de las líneas rectas (cuerdas) que los unen. El confinamiento de los quarks es automático.

Los quarks son productos del razonamiento teórico. Fueron inventados cuando no había ninguna prueba directa de su existencia. La hipótesis del encanto añadió un nuevo quark que explicaba las propiedades de otra gran familia de partículas cuando estas partículas nunca habían sido observadas. El color, un concepto mucho más abstracto, postula tres variedades de quarks, que pueden ser distintas pero completamente indistinguibles. Ahora, las teorías del confinamiento de los quarks sugieren que todos los quarks pueden ser permanentemente inaccesibles e invisibles. El éxito del modelo quark nos conduce de nuevo a la pregunta del carácter real de los quarks. Si una partícula no puede ser aislada u observada, ni siquiera en teoría, ¿cómo sabremos nunca que existe?

Corrientes de convección en el manto terrestre

El movimiento continuo de las placas que forman la corteza terrestre prueba la existencia de corrientes de convección a gran escala. Los estudios de laboratorio indican que también ha de existir corrientes de menor importancia

D. P. McKenzie y Frank Richter

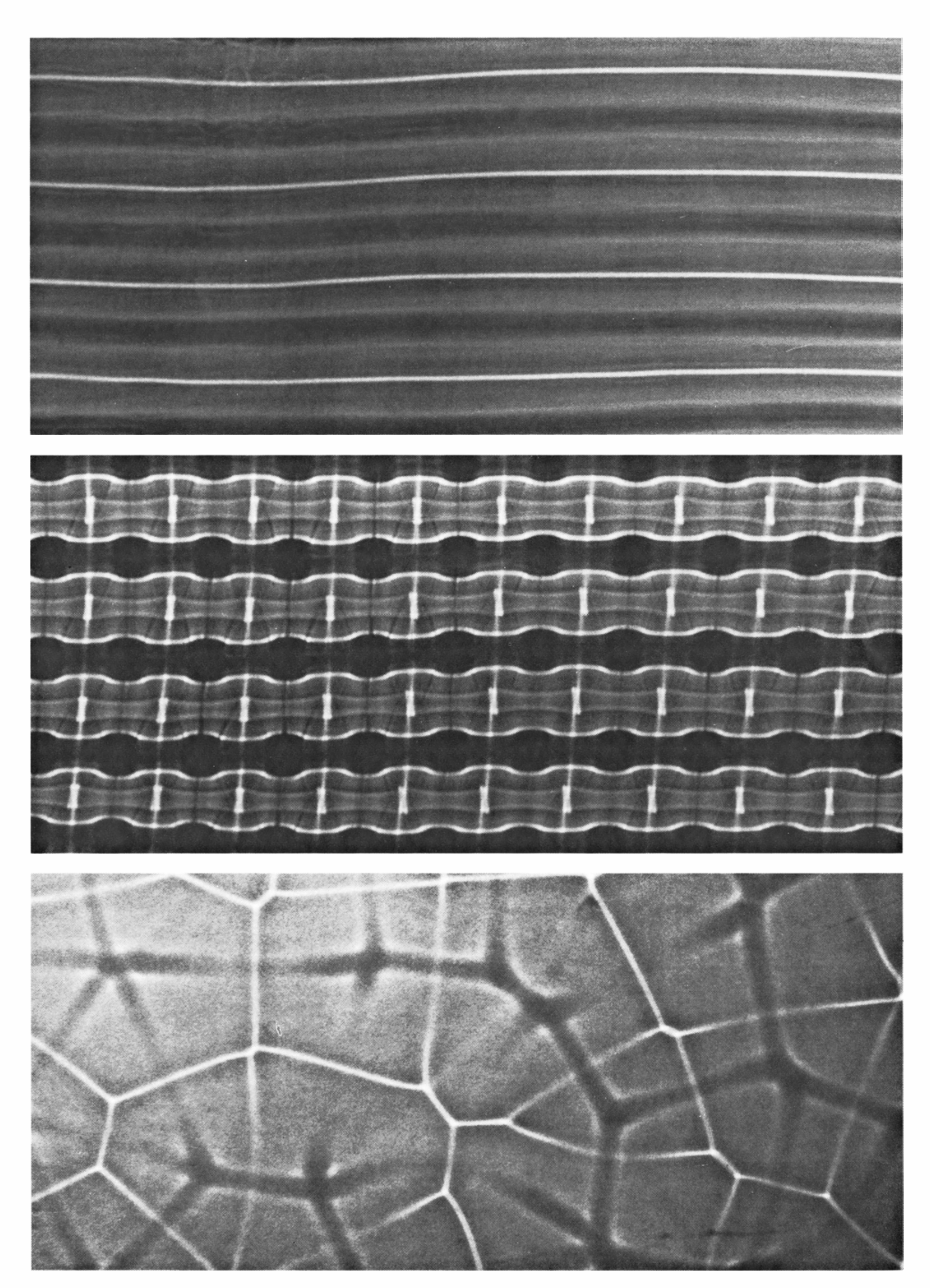
Durante muchos años, los geofísicos dieron por supuesto que las rocas que forman el manto terrestre, la región profunda y plástica situada por debajo de la corteza de la tierra, se movían lentamente en vastas células de convección con el consiguiente ascenso de aquéllas en unas regiones y su enfriamiento y hundimiento en otras. En los últimos doce años, con la aceptación general de la tectónica de placas, se ha hecho evidente la existencia del fenómeno de convección a escala general. La corteza terrestre está formada por grandes placas, casi rígidas, que crecen hacia fuera a partir de las dorsales del fondo oceánico, en donde las rocas fundidas ascienden; con el tiempo, se hunden de nuevo en el manto cerca de las fosas oceánicas profundas. El movimiento de las placas desde una dorsal centro-oceánica hasta una fosa marca la mitad visible del bucle convectivo. La masa de la placa descendente debe conservarse y el bucle cerrarse mediante el retorno, en profundidad y por fluencia, de material desde la fosa a la dorsal. Puesto que la dimensión horizontal del bucle se corresponde con las dimensiones de una placa, en la actualidad se suele denominar al bucle completo circulación a gran escala. En el caso de la placa del Pacífico, la dimensión horizontal alcanza 10.000 kilómetros.

A pesar de que la circulación a gran escala puede describirse hoy de forma precisa, y casi con seguridad representa una forma de convección térmica del manto superior de la tierra, no existe todavía ninguna teoría satisfactoria que explique cómo se mantiene la circulación durante decenas de millones de años. Las tentativas de respuesta a esta cuestión, con la ayuda de experiencias de laboratorio y simulación mediante computadores, han aportado pruebas sobre la posibilidad de una convección a escala menor en la que las células de este tipo tendrían una dimensión horizontal comparable a su profundidad: unos 700 kilómetros. Las experiencias sugieren que tales células podrían explicar el flujo de calor existente bajo zonas antiguas de las placas oceánicas, que es mayor de lo que cabría esperar, y tal vez podrían dar cuenta de las anomalías gravitatorias de los fondos marinos. Las células de convección a pequeña escala podrían producir igualmente las corrientes ascendentes de material a elevada temperatura, responsables de la formación de cadenas de volcanes oceánicos como las islas Hawai. Por último, las experiencias llevadas a cabo sugieren que las células de convección a pequeña escala pueden hallarse alineadas en cilindros largos y paralelos, situados bajo placas que se muevan a velocidades parecidas a las que sufre la placa pacífica. Sin embargo, no se ha podido simular todavía en el laboratorio la convección a gran escala, tan evidente por otra parte en el marco del movimiento general de las placas.

Los movimientos de las placas

En cualquier intento encaminado a comprender las fuerzas impulsoras de las placas, el enfoque más idóneo es aquel que empieza por los modelos teóricos de sus movimientos, considerados a escala mundial, los cuales imponen algunas restricciones en los posibles mecanismos que determinan la impulsión. La enorme mayoría de los grandes terremotos vienen desencadenados por movimientos de las placas, de forma que la energía que liberan debe ser suministrada por las fuerzas impulsoras de las placas. Se han propuesto muchos mecanismos originantes de la energía, pero muy pocos resultan adecuados para explicarla. Los únicos que fácilmente proporcionan energía suficiente son el flujo convectivo, en el manto, y el proceso de diferenciación, en virtud del cual el hierro existente en el manto se disoció de otros elementos y se hundió hasta formar el núcleo de la tierra. Como veremos más adelante, la convección térmica puede originar una gran variedad de disposiciones del flujo; la disposición hexagonal de las células de convección, que con

DISPOSICIONES DE LAS SOMBRAS en las células de convección, vistas desde arriba, en un aparato de laboratorio que simula las condiciones que puede producir este fenómeno físico en las rocas plásticas, constituyentes del manto superior de la tierra. Estas disposiciones pueden observarse gracias a la iluminación efectuada desde abajo y debido al paso de la luz a través de un fluido viscoso y transparente *(véanse las ilustraciones de las págs. 70 y 71).* **Los rayos son refractados desde las regiones calientes hacia fuera y hacia las regiones frías, produciéndose zonas de luz y de oscuridad. Los cambios en las condiciones de experimentación, responsables de las diferentes disposiciones, pueden sintetizarse en términos del número de Rayleigh, que es una cantidad sin dimensiones proporcional a la diferencia de temperatura existente a lo largo de la capa de fluido y a otros parámetros, entre los que se encuentra el espesor de dicha capa. Cuando el número de Rayleigh no llega a 1700, no existe convección; cuando se encuentra entre 1700 y los 20.000, el fenómeno se materializa en forma de dos cilindros paralelos bidimensionales, tal como puede observarse en la foto superior de la página siguiente. Cuando los números de Rayleigh toman valores comprendidos entre 20.000 y 100.000, se generan dos conjuntos de cilindros perpendiculares entre sí** *(foto central);* **esta disposición se denomina flujo bimodal. Para números de Rayleigh mayores, el flujo ofrece una disposición radial complicada, en donde las láminas de fluido caliente ascendentes y las de frío descendentes irradian desde múltiples centros** *(foto inferior).*



tanta frecuencia aparece en los manuales, es extremadamente rara en la naturaleza.

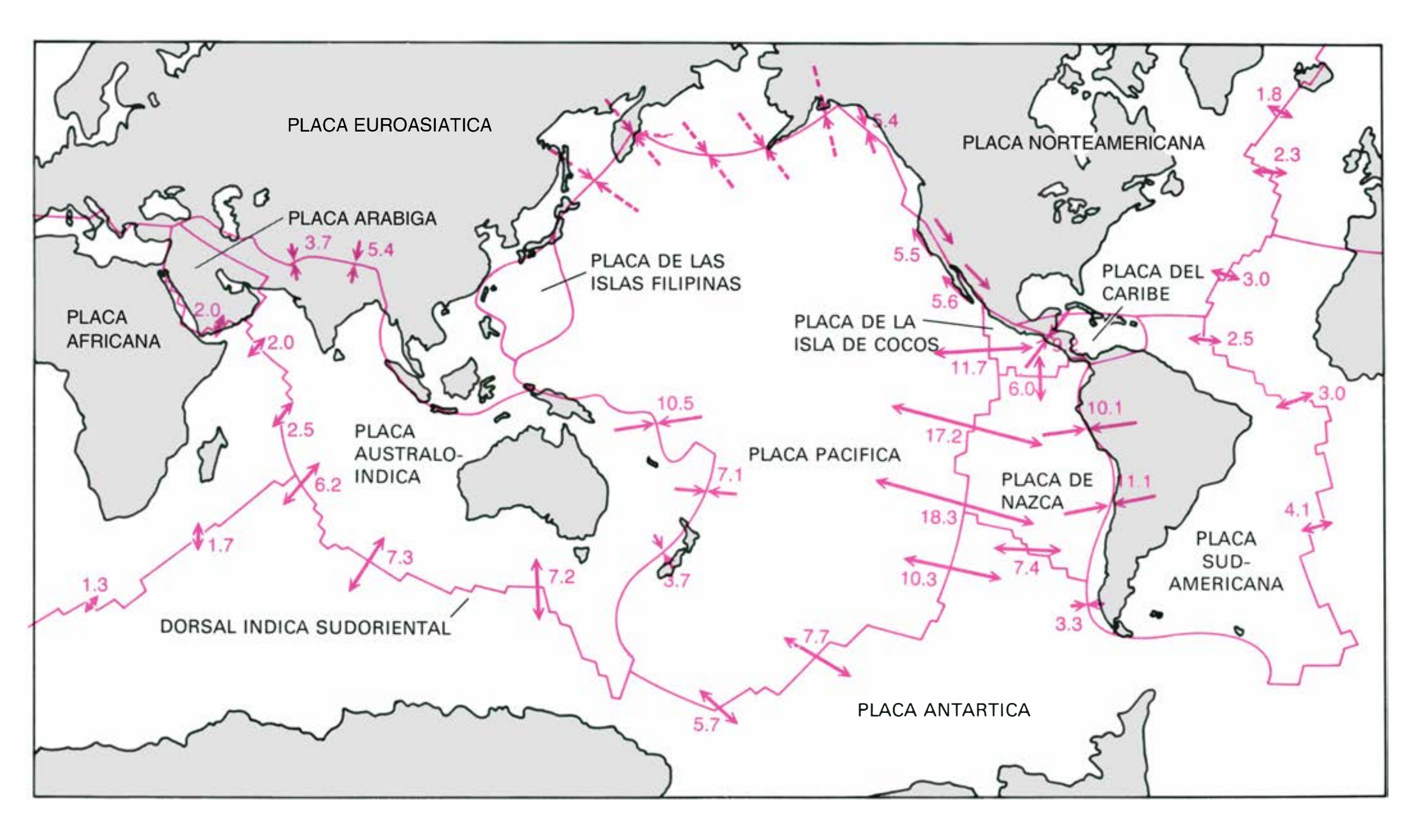
Mejor que por radiación o difusión, la convección térmica implica el transporte de calor por movimiento real de materia. En el tipo de convección que tiene interés en tectónica de placas, el calor sube hacia arriba, y el flujo es impulsado por la diferencia de densidad entre el fluido caliente y el frío. Los cálculos más moderados sobre las fuerzas ascensionales resultantes de los movimientos de las placas son superiores, con mucho, a los cálculos sobre las fuerzas implicadas en los terremotos. Esta argumentación ha convencido a bastantes geofísicos, aunque no a todos, de que los movimientos de las placas se sostienen por alguna forma de convección.

Las observaciones geofísicas pueden darnos una idea somera de la profundidad lograda por el flujo convectivo. No se ha localizado aún con precisión ningún hipocentro de movimiento sísmico cuya profundidad rebasara los 700 kilómetros. Además, las porciones de placa que se hunden debajo los arcos de islas, donde aquéllas convergen, sufren una compresión cuando sus bordes frontales se extienden a profundidades de más de 600 kilómetros, mientras que se encuentran en tensión a profundidades de menos de 300 kilómetros, si su borde más avanzado no llega a este último valor. La explicación más sencilla de este comportamiento parte de que la porción de placa encuentra gran resistencia para su movimiento a 600 km y se muestra incapaz de penetrar por debajo de los 700 kilómetros. El aumento de la fuerza de resistencia está, probablemente, asociado a un cambio en la estructura cristalina de los silicatos de hierro y magnesio que ocurre a esa profundidad. Cualquiera que sea la explicación adecuada y global, lo cierto es que el comportamiento de los trozos de placas que se hunden apoyan poderosamente la idea de que la circulación convectiva, de la que forman parte las placas, está encerrada en una región que tiene 700 kilómetros de profundidad. No es necesario referir aquí lo que ocurre en el manto a profundidades mayores (a pesar de que parece probable también la existencia de convección en el manto inferior).

Es difícil decir algo más en torno a la forma del flujo partiendo únicamente de las observaciones geofísicas. Las placas son fuertes y resistentes; y sus movimientos rígidos esconden las traslaciones tridimensionales harto complicadas que tienen lugar en el manto subyacente. Resulta más difícil estudiar la convección en el manto que hacer lo propio con la circulación oceánica o la atmosférica. No hay ningún sondeo que pueda atravesar una placa, y las perforaciones más profundas con muestras representan solamente el 10 por ciento (la parte superior) del espesor total de aquélla. Si a pesar de lo cual se pudiera penetrar en el manto, nos encontraríamos con el problema de medir corrientes de convección que se mueven a velocidades de sólo unos pocos centímetros por año.

Los números de Rayleigh y de Reynolds

Afortunadamente, los fisicomatemáticos se han venido interesando por la convección desde el siglo XIX; de ahí que se conozca bastante bien el comportamiento de ese tipo de corrientes. Quizás el hallazgo más notable sea cuán complicado puede ser el flujo convectivo

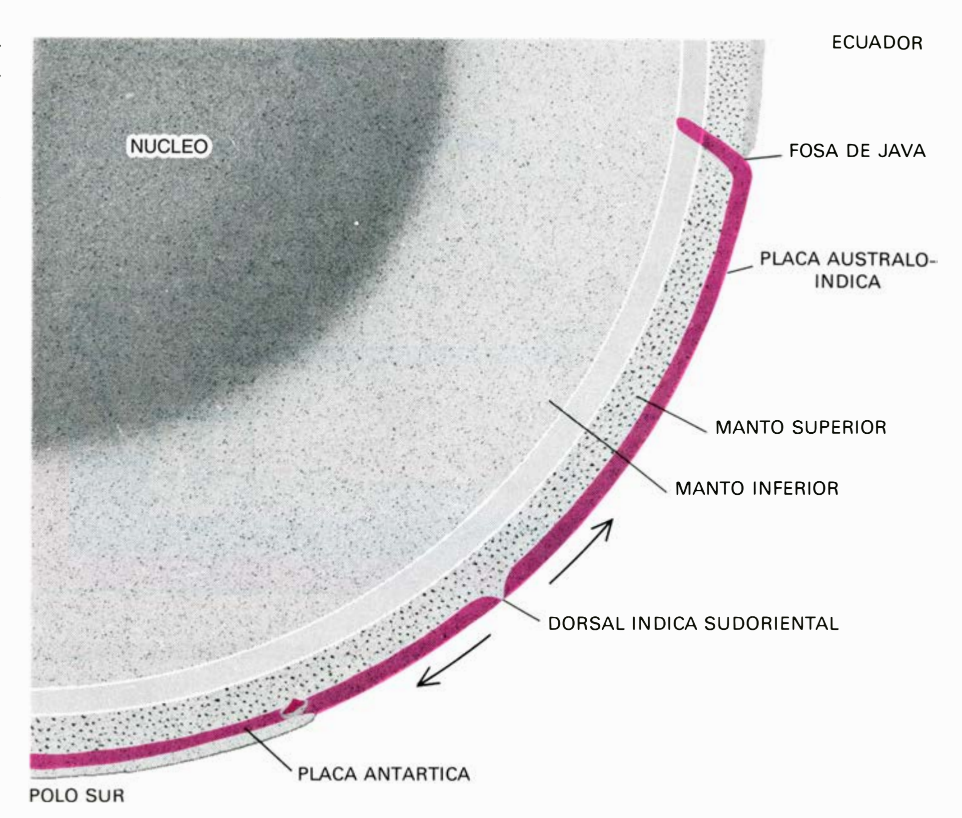


LA PRUEBA DE LA EXISTENCIA DE CONVECCION en el manto viene aportada por los movimientos de las doce placas en que suele dividirse la corteza terrestre. La adición de material a las placas se realiza a través de la subida de roca fundida a lo largo de las dorsales del fondo oceánico, que marcan el centro de una cresta que se extiende de forma continua en unos 70.000 kilómetros a través de los océanos Atlántico, Indico y Pacífico. Las placas vuelven a hundirse en el manto en las zonas de subducción, las cuales coinciden con las fosas oceánicas. Las líneas cuyas flechas apuntan en sentidos opuestos, y hacia fuera, indican los lugares de las dorsales donde las placas se separan. Los números recogen la velocidad relativa en centímetros por año. Las placas australoíndica, pacífica y de Nazca son las que se mueven más rápidamente. Las líneas con flechas contrapuestas que apuntan hacia la dorsal designan los sitios donde las placas convergen, lo cual suele ocurrir en las fosas. La cordillera del Himalaya es una excepción importante. Las placas pueden tener también movimientos laterales a lo largo de las fallas transformantes, como por ejemplo la falla de transformación de San Andreas, en la costa occidental de Norteamérica.

incluso en una capa de fluido uniformemente calentado desde abajo. Por supuesto, la convección registrada en el manto terrestre encierra mayor complejidad.

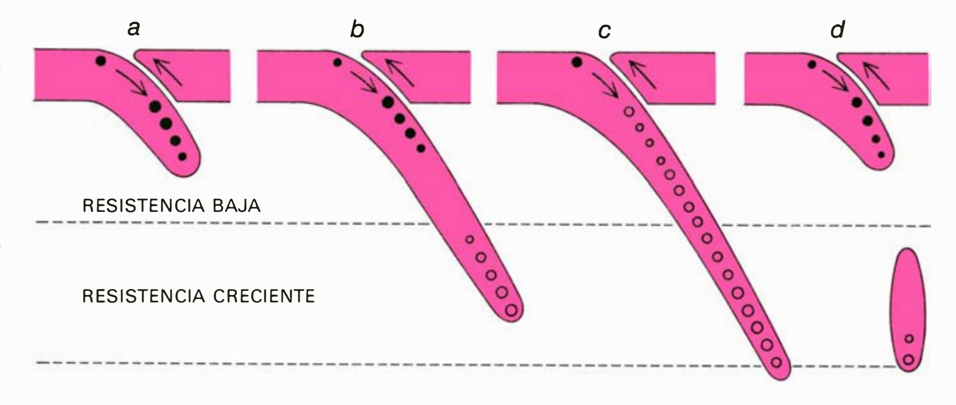
Entre quienes contribuyeron de forma destacada en la descripción matemática del flujo de fluidos (convección inclusive) hay que nombrar a lord Rayleigh y a Osborne Reynolds. Merced a cuyos trabajos se puede describir cualquier tipo de flujo convectivo utilizando solamente unos pocos números, que llevan los nombres de estos dos investigadores; se trata de combinaciones sin dimensión de varios parámetros físicos, como la viscosidad, la conductividad térmica y el coeficiente de expansión térmica. Con la ayuda de estos números se puede simular la convección del manto terrestre en una capa de fluido de pocos centímetros de espesor. Y ello porque la convección depende de la combinación de las propiedades de la capa de fluido y no de cada una de estas propiedades, individualmente consideradas. El número de Rayleigh depende, en parte, de la razón entre el cubo de la profundidad y la viscosidad; así, se puede construir un modelo de un sistema como el manto superior, que tiene una viscosidad muy elevada y una profundidad de centenares de kilómetros, con un fluido de viscosidad moderada. Se puede acelerar igualmente el paso del tiempo, de forma que los procesos que tardarían millones de años en realizarse en la tierra duren únicamente unas pocas horas en el modelo de laboratorio.

El número de Rayleigh resulta particularmente significativo a la hora de construir un modelo de convección. Es proporcional a la diferencia de temperatura entre la parte superior y el fondo del fluido y proporcional también a otros varios parámetros. En un fluido en convección, el número de Rayleigh es prácticamente proporcional al cociente entre el tiempo necesario para calentar una capa de fluido por conducción térmica y el tiempo necesario para que una partícula de fluido circule una vez alrededor de la célula. Un ejemplo común de un fluido en convección, con un número de Rayleigh alto, lo tenemos en el agua calentada en una cacerola sin que llegue a hervir. El fluido existente en el interior de un huevo colocado dentro del recipiente representa un sistema con un número de Rayleigh pequeño, debido a que su contenido es mucho más viscoso que el agua. (Como resultado de lo cual, el color de cocción del huevo, más que por convección, se distribuye por conducción.)

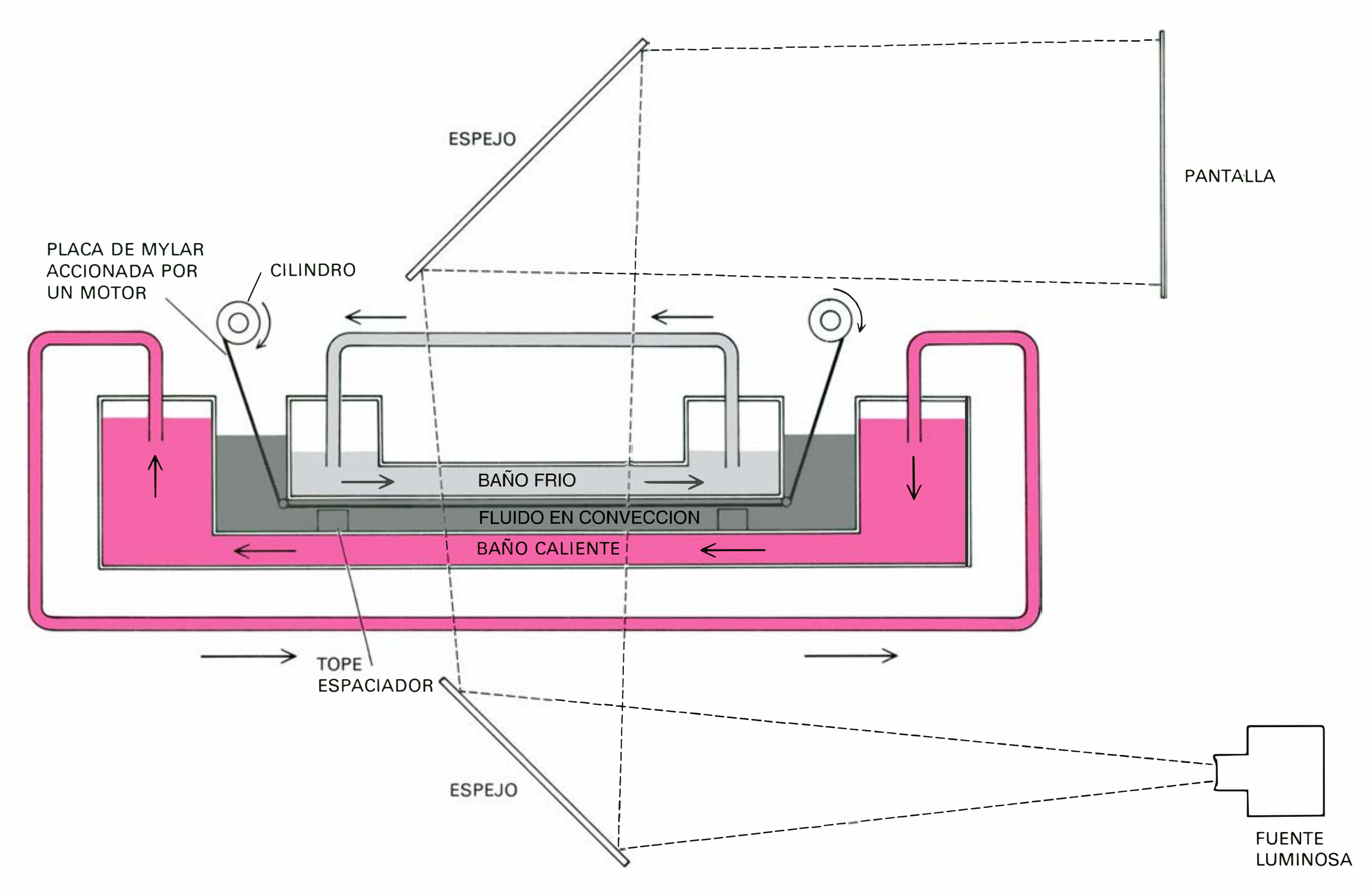


CORTE DE LA TIERRA a escala real que ilustra la configuración de las placas desde el ecuador hasta el polo sur, a lo largo del meridiano 110° E. Las placas *(color)* se originan en las dorsales centrooceánicas y generalmente descienden al manto en las fosas adyacentes a los arcos de islas. El movimiento de las placas transporta por convección alrededor de la mitad del calor que atraviesa el manto superior de la corteza terrestre.

El número de Reynolds no está en relación con el calor sino con el momento de las fuerzas que actúan. Mide la relación entre las fuerzas que aceleran el fluido y las fuerzas viscosas que se oponen a su movimiento. Cuando el número de Reynolds es pequeño, la inercia del fluido carece de importancia y el flujo es muy simple. Pero cuando el número es alto, cabe esperar que se formen remolinos y el flujo sea turbulento y extremadamente complejo. Ejemplos de flujo con un número de Reynolds elevado son el agua que sale a chorro de un grifo o un torrente de montaña rompiendo sobre las rocas; las perturbaciones atmosféricas



LAS PLACAS DESCENDENTES encuentran una resistencia cada vez mayor a medida que van profundizando en el manto superior. A una profundidad de 200 kilómetros, en *a*, la porción de placa sufre una tensión y un movimiento de separación tal como indican los círculos negros. En *b*, la parte superior continúa en tensión, pero la parte de placa que se encuentra por debajo de los 300 kilómetros sufre una compresión *(circunferencias)*. En *c*, la parte extrema de la placa, por debajo de los 600 kilómetros, encuentra una resistencia tal que toda ella está en compresión. En algunos casos, existen trozos de placa que se rompen hundiéndose hasta los 600 kilómetros. Este tipo de observaciones sugieren que el flujo convectivo que implica el movimiento de placas está confinado a profundidades del manto menores de 700 kilómetros.



EL APARATO QUE REPRODUCE el flujo convectivo simula las condiciones reinantes en el manto superior de la tierra. El fluido en convección es un aceite con silicona, viscoso, calentado desde abajo y refrigerado desde arriba. Las propiedades de este aceite, en combinación con flujos de calor y espesor de fluido adecuados, reproducen los números de Rayleigh en el intervalo existente entre 1700 y 10^6, aproximadamente. El espesor del fluido puede variar entre unos 1,6 y 7 centímetros. La región sujeta a convección mide unos 100 centímetros de lado. Para simular el efecto de una placa en movimiento sobre el dispositivo de la convección, puede moverse una lámina delgada de Mylar a través de la superficie del aceite. Con pocas horas se reproducen acontecimientos que durarían millones de años a la escala de la tierra.

constituyen otro ejemplo. Cuesta comprender y reproducir tales tipos de fluidos en un modelo.

El material viscoso que fluye en el manto terrestre tiene un número de Reynolds muy pequeño, alrededor de 10^{-10}, y el momento del flujo es despreciable. Se podría esperar que la convección en el manto estuviera fuertemente condicionada por la rotación terrestre, pero puede demostrarse que esta última no tiene ningún efecto directo sobre la primera. La significación del número de Rayleigh es mucho mayor debido a que este número es bastante alto. A pesar de que los valores calculados varían, el límite inferior es de alrededor de 10^6 pudiendo este número ser mayor en un factor de 10, o más. No es difícil producir estos números de Rayleigh en el laboratorio calentando un fluido, como glicerina o aceite con silicona, de una capa de unos pocos centímetros de espesor y flanqueado entre dos placas.

Cuando el número de Rayleigh en un sistema de este tipo es menor de 1708 no puede producirse convección térmica, y el calor se propaga directamente por conducción desde la placa inferior caliente hasta la placa superior fría. Si se genera en el fluido una perturbación pequeña, esta desaparece con el tiempo. Un estado como el descrito se considera estable, pero no tiene por qué ser estático. Cuando el número de Rayleigh se eleva hasta situarse entre 1708 y 20.000, el sistema se torna inestable pudiendo desarrollarse pequeñas perturbaciones en las células de convección. La forma de éstas y su disposición horizontal dentro de la capa, denominada dispositivo funcional de la convección, dependen de la forma de la perturbación inicial.

Tipos de células

El dispositivo funcional elemental consta de dos células bidimensionales, es decir, dos cilindros que giran sobre sus ejes mayores. Las células tridimensionales pueden producirse mediante una perturbación inicial también tridimensional. Sabemos que, en el intervalo de los números de Rayleigh comprendido entre 1708 y 20.000, dos células bidimensionales y cilíndricas son estables en presencia de pequeñas perturbaciones. Partimos del supuesto de que todos los flujos tridimensionales evolucionan lentamente hacia la configuración de dos dimensiones. Pero no tenemos certeza de que así sea, porque la evolución es muy lenta y los propios experimentos de varios meses de duración no han resuelto completamente la cuestión.

Si el número de Rayleigh se aumenta a 20.000, o a una cifra parecida, dos células cilíndricas bidimensionales no permanecen ya estables. En ese caso se origina otro conjunto de cilindros, dispuesto perpendicularmente al original, que da lugar a una red tridimensional de células rectangulares, denominándose convección bimodal a esta disposición del flujo. Si estas células se generan con sumo cuidado en el laboratorio, todas ellas resultan virtualmente idénticas. Como es lógico, cuando la disposición no es bidimensional para los números de Rayleigh más bajos, en cuya tesitura las células cilíndricas son estables, a medida que el número de Rayleigh aumente

no se producirá ningún cambio repentino hacia el flujo tridimensional.

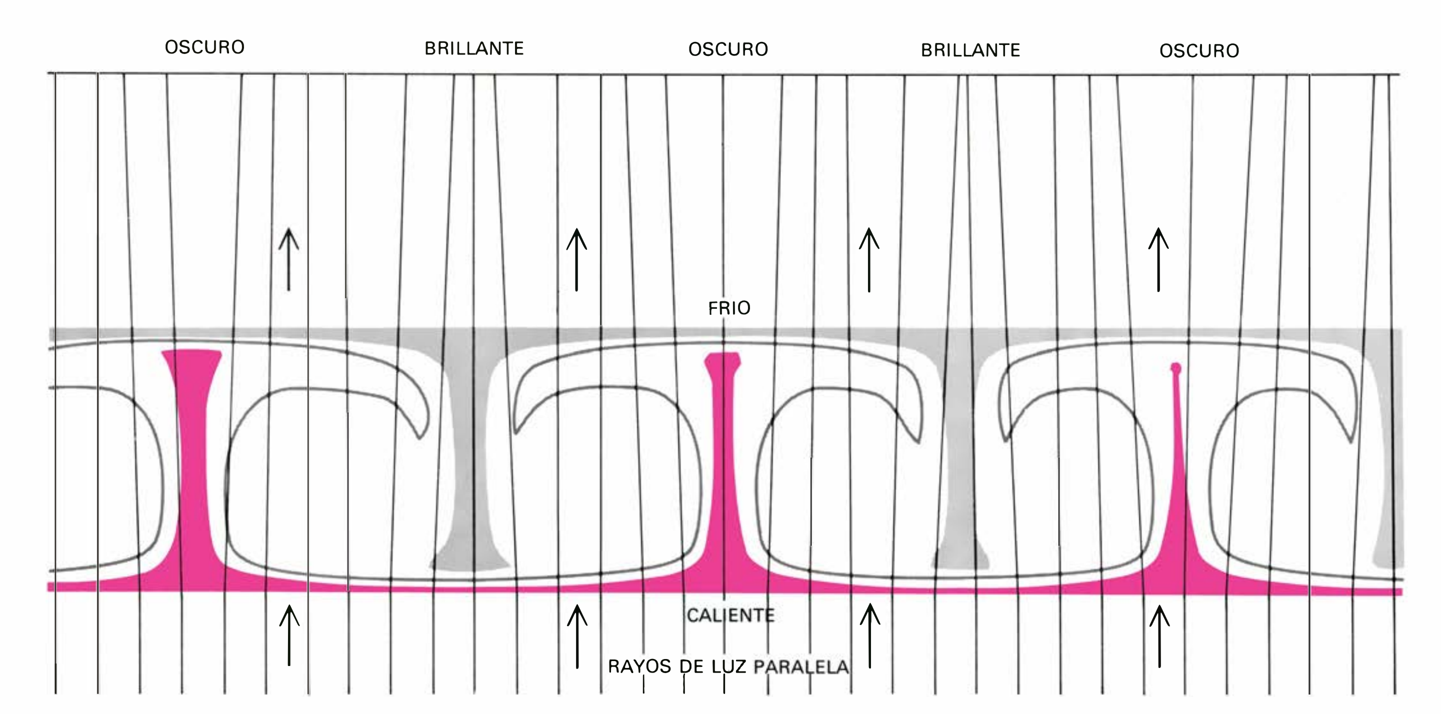
Para números de Rayleigh por encima de los 100.000, la disposición bimodal se rompe de una forma bastante complicada. Allí donde los dos conjuntos de células cilíndricas se cruzan en la disposición bimodal, existen puntos en que el fluido se hunde o asciende a mayor velocidad que en cualquier otra parte. Conforme aumenta el número de Rayleigh, estos puntos se mueven conjuntamente y distorsionan la disposición bimodal. La disposición resultante consta de una porción de puntos con ascensión intensa unidos entre sí por láminas verticales de fluido descendente (o puntos de descenso unidos por láminas de fluido ascendente); tal disposición recibe el nombre de disposición radial.

¿Qué ocurre cuando tenemos números de Rayleigh mayores, comparables a los del material que constituye el manto terrestre? Esta pregunta tiene difícil contestación debido a que el número de Reynolds de la convección radial que se produce en los experimentos de laboratorio posee un valor relativamente grande, cercano a 1, incluso en el caso de que el fluido sea muy viscoso y los efectos del momento de las fuerzas empiecen a ser importantes. La convección pasa a depender del tiempo, es decir, su disposición funcional cambia con el tiempo. Todavía se sigue pareciendo a la disposición radial pero los centros donde convergen los radios están más separados y la posición de las láminas ascendentes y descendentes cambia constantemente. Sospechamos que esto ocurre sólo cuando el número de Reynolds no es pequeño.

La característica más notable de las disposiciones cilíndrica, bimodal y radial, consiste en que la distancia horizontal entre las regiones donde se produce el ascenso y el descenso es siempre, más o menos, la misma que la distancia que nos indica la profundidad de la capa. Para una determinada diferencia de temperatura entre el fondo y la parte superior de la capa, las células cuadratiformes transportan más calor que las que tienen otras formas. Sin embargo, este funcionamiento no es muy útil cuando se intenta un modelo de la convección, a gran escala, que mueve las placas terrestres (en el supuesto de que el flujo existente en el manto no se extienda por debajo de los 700 kilómetros). Sería maravilloso poder producir en el laboratorio células de convección cuya anchura fuera varias veces superior a su profundidad.

El calentamiento del fluido

El manto no es un fluido uniforme calentado desde abajo, sino que contiene elementos radiactivos cuya desintegración lo calienta parcialmente desde su interior mismo. Además, la viscosidad del material que lo constituye y su resistencia a la deformación varían marcadamente con la temperatura; por cuya variación, las placas (frías, de poco espesor y formadas por este tipo de material) son tan rígidas. En realidad, la variación es tan grande que muchos geofísicos se preguntan si es adecuado describir como fluido viscoso la materia que constituye el manto. ¿Hasta qué punto este tipo de consideraciones complican realmente el esfuerzo realizado para desarrollar un modelo del flujo convectivo del manto? La verdad es que la mayor parte de las investigaciones hechas hasta ahora han utilizado sistemas de convección muy simples, en los que la capa de fluido se calienta solamente desde abajo. Sin embargo, se han realizado algunos descubrimientos importantes relativos a la convección gracias, sobre todo, a los experimentos en que han intervenido los computadores. Como se vio, cuando el motor de la convección es el calor suministrado desde abajo este último es transportado por surtidores calientes o láminas de fluido que ascienden desde el fondo del recipiente y por fluido frío descendente que procede de la parte superior. Para números de Rayleigh grandes, este tipo de flujo da lugar a una capa horizontal delgada, de fluido caliente adyacente al fondo y a una capa similar de fluido frío adyacente al límite superior.



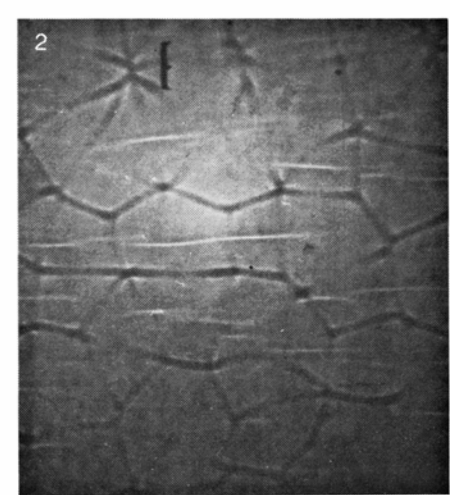
LAS CELULAS DE CONVECCION SIMPLES consisten en dos células cilíndricas bidimensionales; aparecen aquí contrapuestas formando un ombrograma, como el que se reproduce en la parte superior de la página 67. La iluminación se hace desde abajo con luz paralela que atraviesa el fluido. En las regiones calientes, los rayos son refractados hacia fuera de las mismas y hacia las regiones frías. Las láminas de fluido ascendente están indicadas por la línea oscura que, a veces, presenta en cada lado bordes brillantes. Las láminas de fluido frías y descendentes están marcadas por una línea brillante. Las células de convección suelen tener un ancho parecido a su profundidad.

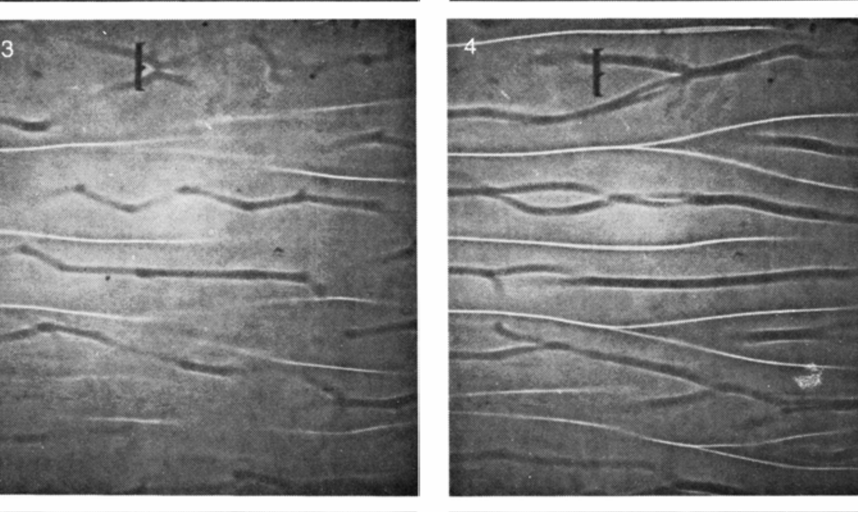
Entre estas dos capas existe una región donde la temperatura varía poco desde su parte superior hasta la inferior. A medida que el número de Rayleigh va aumentando, el tiempo que tarda el fluido en efectuar el circuito completo va disminuyendo y, reduciendo su espesor, las delgadas capas del fondo y de la parte superior. Sin embargo, cuando se obtiene calor por generación interna no existe la capa inferior. El calor debe ser transportado a la parte superior por todo el fluido que, al pasar por la proximidad de ésta, pueda conducirlo hacia fuera. No existía, pues, ninguna región "pasiva" en el centro de la célula.

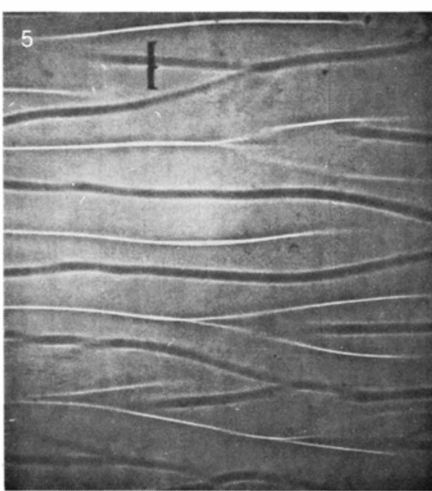
Este estado de cosas convierte en inestable el límite de la capa superior fría, y da lugar a un funcionamiento complicado, dependiente del tiempo, cuando el número de Rayleigh sobrepasa los 40.000, aproximadamente. Los surtidores y las láminas de fluido descendente se materializan espontáneamente gracias a las inestabilidades que se producen en el límite de la capa superior. Una vez formadas, se trasladan hacia otras regiones con descenso y se combinan con ellas dirigiéndose hacia el interior del fluido. Luego, el ciclo se repite. La forma general del flujo recuerda de cerca el movimiento de las placas con un límite superior determinado por una capa delgada y fría y láminas descendentes, pero la dimensión horizontal del movimiento es, una vez más, similar a la profundidad de la capa en convección.

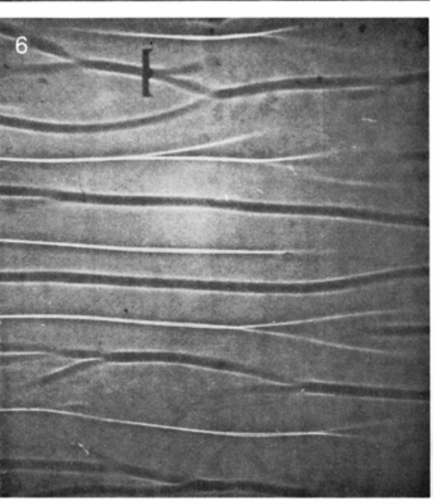
En todas las experiencias de laboratorio, el fluido caliente es menos viscoso que el frío; pero la variación en esa propiedad física sólo afecta de manera importante al primero cuando la viscosidad de la región caliente es menor que la de la fría en un factor de 10, o mayor. Cuando el motor de la convección es el calor suministrado desde abajo, la región ascendente, de baja viscosidad y caliente, se hace más delgada y, la región descendente, más ancha de lo que sería de esperar en el caso de que hubiera poca diferencia de viscosidad. Cuando el calor viene suministrado desde el interior mismo del fluido, no hay ningún cambio pronunciado en la forma del flujo, incluso en los puntos donde hay grandes diferencias de viscosidad. Las experiencias que se han realizado hasta el presente con calentamiento interno son bastante limitadas y dan a entender que este tipo de calentamiento tiene mayor influencia en la forma de la convección que la que pueden tener las diferencias de viscosidad. Recientemente, se han realizado experiencias con computadoras sobre convección de fluidos que, no sólo presentan variaciones de viscosidad, sino que se comportan también según las leyes de flujo más complicadas y reales propias de la deformación de las rocas a temperaturas elevadas. Sorprendentemente, la introducción de estas leyes tiene poca influencia en el flujo.

Aunque es obvio que hay que conocer mucho mejor la disposición y el funcionamiento de la convección en fluidos de viscosidades distintas y la convección accionada por calentamiento interno, se ha visto que todas las células cuya anchura sea cinco veces superior (o más)









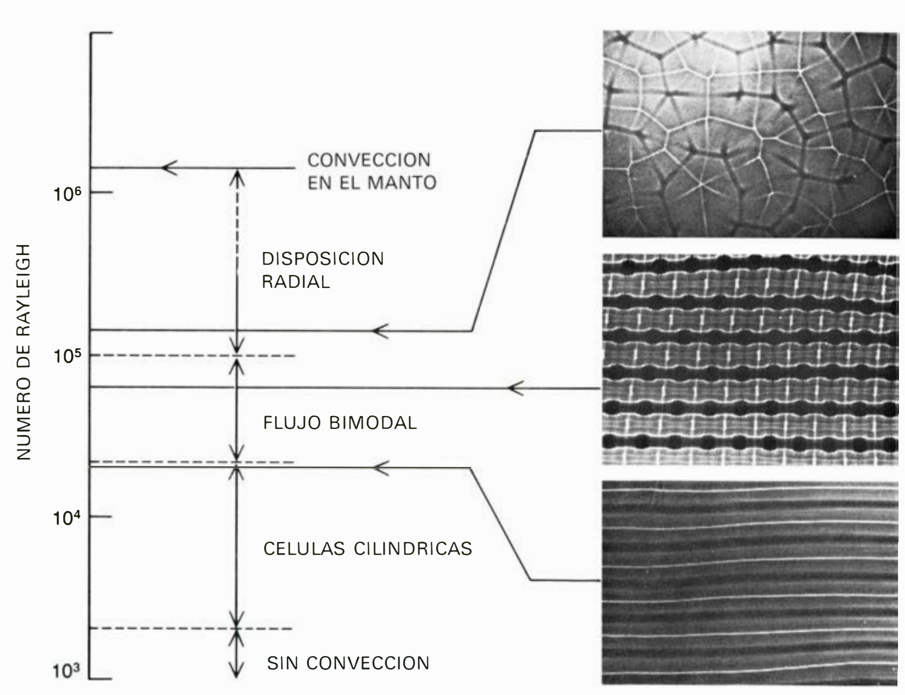
EL EFECTO DE CIZALLA sobre la disposición radial se estudia en los aparatos descritos en las páginas 70 y 71. Después de que una disposición convectiva característica de un número de Rayleigh de 140.000 se haya estabilizado ***(primera foto),*** **se pone en movimiento la lámina de Mylar para simular la traslación de una placa por el manto. Las fotos siguientes, hechas a intervalos de tiempo iguales, muestran la reorganización de la disposición convectiva como resultado del movimiento de la placa de Mylar en su traslación de izquierda a derecha. La cizalla convierte la disposición radial en cilindros cuyos ejes son paralelos a la dirección del movimiento de la placa. El trazo negro vertical indica la profundidad del fluido.**

a la profundidad de la capa en convección son inestables. Varios investigadores han producido células estables, pero el flujo se mantenía estable porque se suprimían artificialmente las inestabilidades existentes entre los contactos de las capas a diferente temperatura.

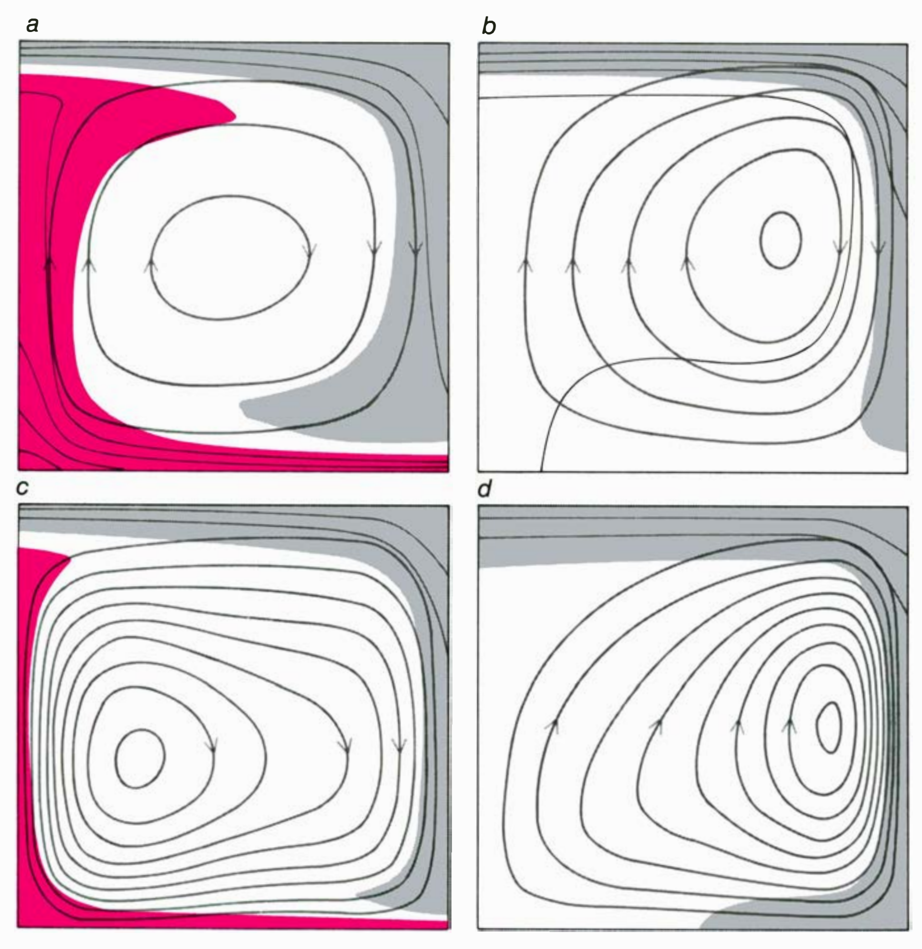
La convección a pequeña escala

Una forma inmediata de conciliar las observaciones geofísicas, que demuestran una extensión horizontal mínima de 10.000 kilómetros para las células, con las experiencias realizadas en el laboratorio y con los computadores, estriba en suponer que la convección en el manto se extiende desde la superficie hasta la región donde este último encuentra el núcleo terrestre a una profundidad de 2900 kilómetros. Existen varias objeciones a un modelo de este tipo; la más importante: la gran resistencia que los trozos de placa descendentes encuentran a una profundidad de 700 kilómetros. Hay otra dificultad más compleja. Si el flujo se extiende por todo el manto debe accionarse, casi enteramente, mediante calentamiento interno; ello implica un número de Rayleigh de 50 millones, como mínimo. Según se vio, bajo estas condiciones, existen muchos surtidores y láminas que se hunden desde la superficie superior fría, siendo la distancia entre ellos de sólo una pequeña fracción de la profundidad de la capa en convección. Para conseguir las condiciones en las que no se produzca este tipo de flujo a pequeña escala hay que rebajar el número de Rayleigh en un factor de 1000 como mínimo (o bien de alrededor de 50.000). A pesar de que nuestro conocimiento de los parámetros físicos del interior de la tierra no sea muy preciso, no parece que exista forma de acomodar el número de 50.000 con el valor mínimo calculado de 50 millones que se requiere para la existencia de una convección profunda en el manto. Preferimos un modelo en el que la convección esté confinada en los 700 kilómetros del manto externo. Entonces, el flujo viene impulsado, en parte, por el calor generado dentro del fluido y, en parte, por el producido en el manto inferior, y quizás en el núcleo, llegando este último calor por conducción hasta la base del manto superior.

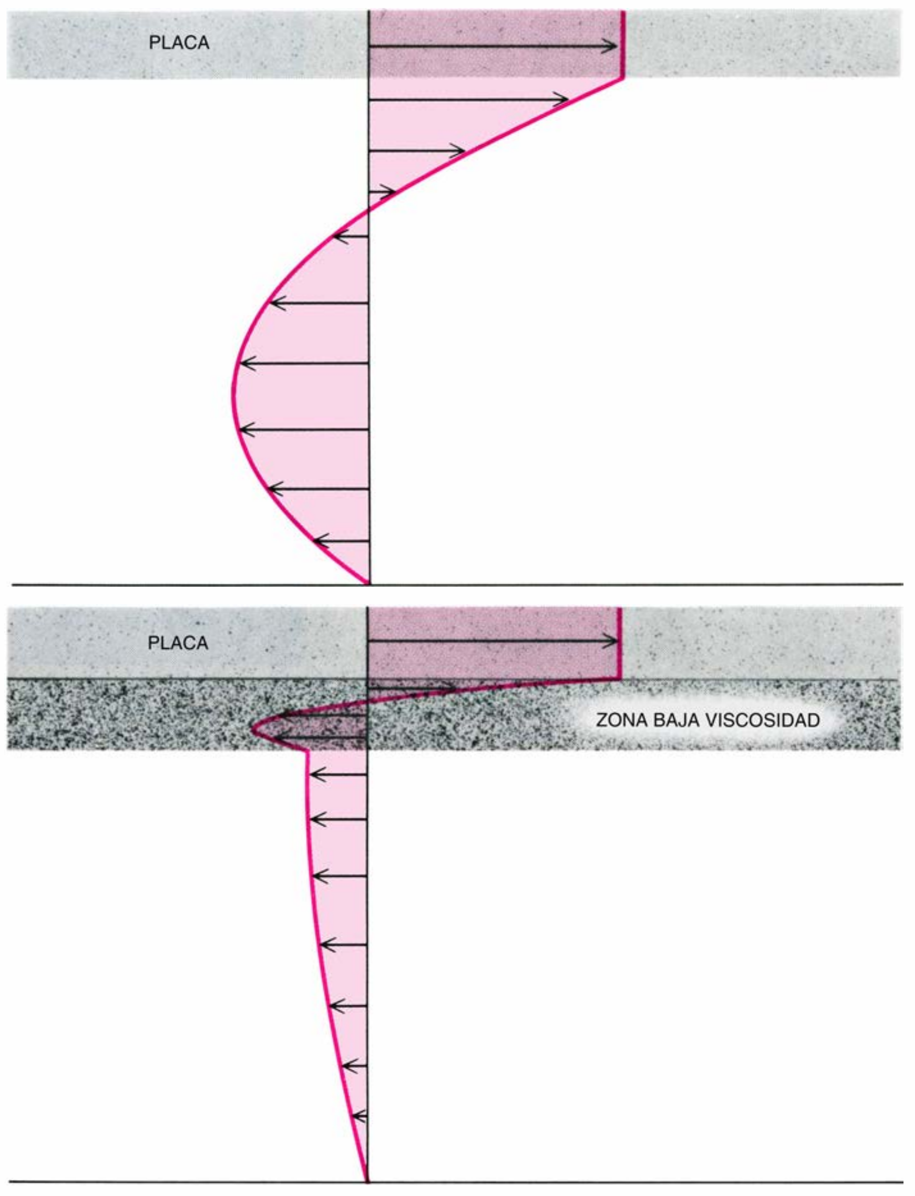
Los resultados experimentales implican claramente la existencia de convección a pequeña escala en el manto superior con distancias de unos 700 kilómetros entre la región ascendente y descendente. Además, tiene que existir una



LA CONVECCION EN EL MANTO implica números de Rayleigh situados entre 10^6 y 10^7. La disposición convectiva se va haciendo más compleja al pasar de la célula cilíndrica al flujo bimodal y a las disposiciones radiales, conforme va en aumento el número de Rayleigh.



CELULAS DE CONVECCION SIMULADAS en computador muestran cómo los modelos son afectados por las variaciones en la viscosidad del fluido y por el sistema de calentamiento. Cuando la viscosidad es constante y el fluido es calentado desde abajo *(a)* las láminas ascendentes y descendentes del fluido son casi simétricas. Cuando el valor es suministrado por el interior de un fluido de viscosidad constante *(b)*, la convección consta de finas láminas descendentes de fluido frío con fluido caliente ascendente desde todas partes. Cuando la simulación del computador se repite para un fluido cuya viscosidad decrece con la temperatura, el calor desde abajo *(c)* produce una célula de convección en la que la lámina caliente ascendente es más fina que la lámina fría descendente. Cuando el calor procede del interior de un fluido de viscosidad variable *(d)*, el modelo apenas cambia con respecto a *(a)* y *(b)*.



EL FLUJO EXISTENTE DEBAJO DE LAS PLACAS puede seguir uno de los dos modelos generales. En uno de ellos *(parte superior),* la viscosidad del material subyacente a las placas es uniforme. De aquí que una capa de fluido de considerable espesor sea arrastrada por el movimiento de la placa. Para que la masa se conserve debe existir un flujo inverso fuerte, a mayor profundidad, en el manto. Sin embargo, si bajo las placas hay una capa de poco espesor, constituida por un material de viscosidad baja *(parte inferior),* los movimientos superficiales están desacoplados del manto y, básicamente, sólo la masa que constituye las primeras necesita ser transportada por un flujo de retorno.

convección a gran escala para explicar las observaciones geofísicas, en particular, para comprender el movimiento de las placas de la superficie. Los fenómenos de convección que implican números de Rayleigh elevados suelen presentarse a escalas diversas. La circulación de la atmósfera y la de los océanos, producida por diferencias de densidad a gran escala, ofrecen ejemplos familiares. En ambos casos, esos movimientos a gran escala se superponen a fenómenos convectivos a pequeña escala, como pueden ser, por ejemplo, las nubes. Sin embargo, la convección existente en el manto resulta completamente diferente de la que se observa en la atmósfera y en los océanos, ya que en aquél el número de Reynolds es pequeño y, el momento, de escaso interés.

Para demostrar la hipótesis de que existen dos escalas de flujo convectivo en el manto necesitamos pruebas geofísicas de la existencia del flujo a pequeña escala. También sería preciso conocer cómo puede mantenerse estable el flujo a gran escala (pues es evidente que es así). El dispositivo funcional del flujo a pequeña escala depende, probablemente, del grado de intensidad en que las placas superficiales y el manto están acoplados. Si entre una placa en movimiento y el manto no existe deslizamiento, un espesor considerable de la parte superior de aquél se verá arrastrada por la primera. En este caso el manto subyacente a la porción que se mueve sufrirá una cizalla intensa.

Podemos simular una situación de este tipo en nuestro aparato de laboratorio disponiendo las cosas de forma que una lámina de plástico (del tipo Mylar) que represente a una placa, se mueva por entre la parte superior del fluido en convección a velocidad constante. Cuando la velocidad de la lámina de plástico sobrepasa un determinado valor (poco elevado), la convección adquiere la forma de cilindros en rotación cuyos ejes están alineados en la dirección de la cizalla. La acción cizallante se limita a transportar el fluido a lo largo del cilindro y, por lo tanto, no ejerce efecto alguno sobre la convección a pequeña escala. Los cilindros convectivos existentes en el flujo que ha sufrido cizalla suelen observarse en la atmósfera, donde toman la forma de "calles" de nubes: hileras paralelas de nubes hinchadas cuyo tamaño es en todas ellas parecido. La cizalla requerida para pasar de la disposición tridimensional bimodal o tridimensional radial a las disposiciones cilíndricas depende del número de Rayleigh. En el laboratorio, las células de convección cilíndrica se forman cuando la velocidad de la lámina plástica corresponde a una velocidad de placa de unos 10 centímetros por año para un espesor convectivo de 700 kilómetros (en el deslizamiento entre la placa y el manto).

El conocimiento general de la física de la convección enérgica es obviamente de gran ayuda para comprender la convección existente en el manto terrestre. En vez de tratar de aplicar las limitadas observaciones geofísicas para adivinar la forma del flujo podemos utilizarlas para comprobar modelos compatibles con experiencias de laboratorio. Sin embargo, tal como decíamos al principio, la rigidez de las placas enmascaran la mayoría de los defectos que puedan ir asociados con la convección a pequeña escala. Dos efectos de cierta importancia, y que no están enmascarados, son las variaciones regionales de la gravedad y las de la profundidad de las cuencas oceánicas.

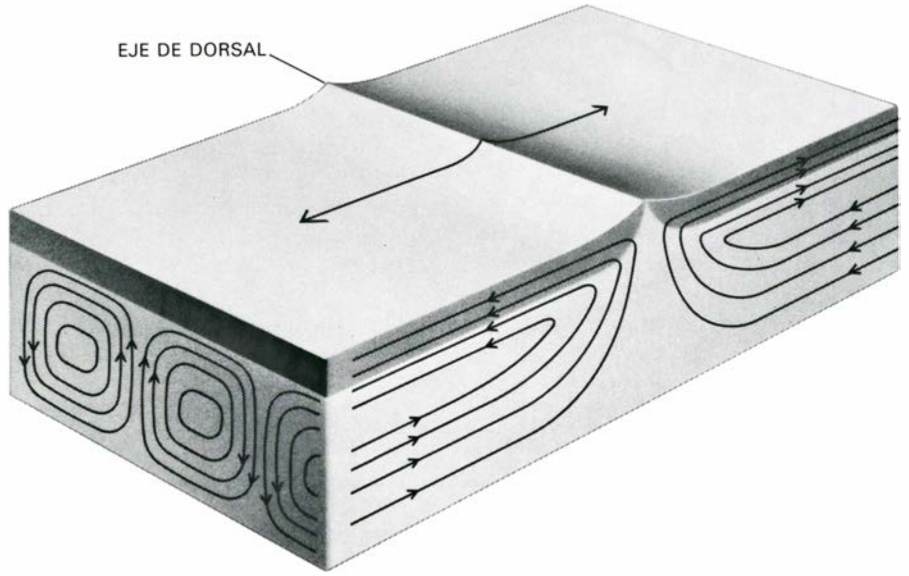
Las anomalías gravitatorias que cubren distancias de 1000 kilómetros, o más, se originan debido a diferencias de densidad en el manto y a sus correspondientes deformaciones en la superficie. Las variaciones que se registran en la profundidad oceánica son algo menos fáciles de interpretar. La variación más evidente en profundidad se debe al enfriamiento y contracción de una placa a medida que se aleja del eje de una dorsal

centrooceánica. En esta última comienza el crecimiento de la placa gracias al ascenso de material caliente procedente del manto. Puesto que todas las placas se enfrían de la misma manera, la profundidad del océano debería estar en función de la edad del material que las constituye en cada punto concreto, a menos que haya otras fuerzas que intervengan. La profundidad prevista puede calcularse con facilidad, y cuando esto se hace de forma cuidadosa, aparecen una serie de desviaciones regionales respecto de los valores calculados en estrecha correspondencia con las anomalías gravitatorias. Existen buenos argumentos para creer que las variaciones de la profundidad y de la gravedad están asociadas con corrientes de convección existentes en la base de las placas.

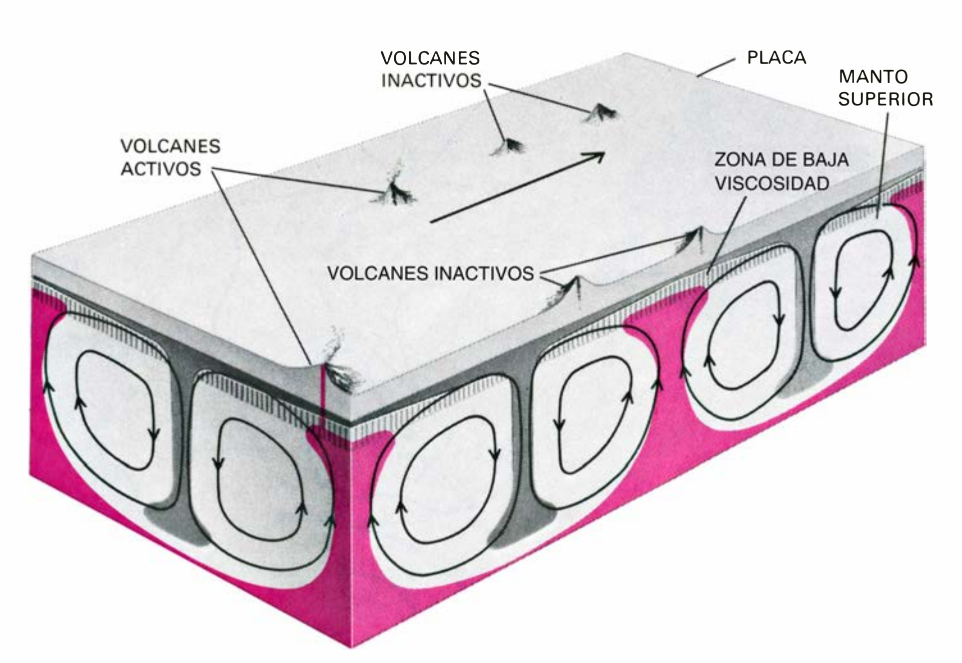
La primera cuestión a la que debemos responder es si las placas en movimiento arrastran con ellas la parte superior del manto o si les separa de los movimientos convectivos, presentes en él, una delgada capa de material de baja viscosidad. Si el movimiento de la placa arrastra consigo mucho material debe existir alguna forma de retorno del flujo a profundidades mayores, pues de lo contrario no podría darse conservación de masa. El flujo de retorno ocurre en virtud del descenso de presión entre las fosas oceánicas profundas, donde la placa se hunde dentro del manto, y las dorsales centrooceánicas. La diferencia de presión requerida para ello debería provocar una inclinación de la parte superior de la placa; pero de momento esto no ha sido detectado, como tampoco se ha encontrado ninguna anomalía gravitatoria que viniera inducida por el material transportado a las fosas o por su flujo de retorno. Por tanto, las observaciones geofísicas favorecen la idea de que existe un desacoplamiento de la placa respecto del manto gracias a una franja de baja viscosidad. La existencia de una zona de este tipo fue propuesta independientemente de la teoría de la tectónica de placas a fin de explicar el amortiguamiento observado en las ondas sísmicas. La capa se forma posiblemente debido a una fusión parcial de las rocas existentes entre la corteza y el manto.

El desacoplamiento de las placas

Una serie de intentos recientes por determinar las fuerzas que actúan sobre las placas, mediante el análisis detallado de sus movimientos, han sugerido, igualmente, que están desacopladas del manto. Sin embargo, se sabe poco de la viscosidad de la capa responsable del desacoplamiento, cuyo espesor resulta probablemente inferior a los 50 kilómetros. Si las placas y el manto están verdaderamente desacopladas, la resistencia al movimiento de las primeras se reduce en gran manera y las distintas fuentes de energía convectiva, asociadas con esos movimientos, pueden proporcionar fácilmente suficiente energía para accionar el flujo a gran escala a las velocidades observadas. La fuente de energía más inmediata es la subida de materiales calientes procedentes del manto, los cua-



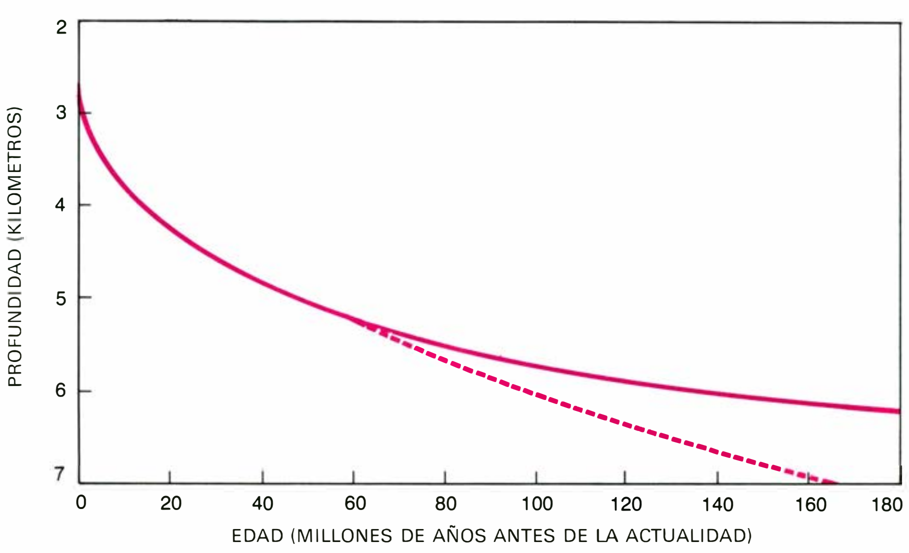
POSIBLE MODELO DE CONVECCION por debajo de las placas, en las cercanías de una dorsal centrooceánica, que permite observar el flujo según dos escalas diferentes. Si las placas se separan a una velocidad suficientemente elevada, a 10 centímetros o más por año, la convección a pequeña escala puede transformarse en cilindros longitudinales de ejes paralelos al movimiento de la placa. Quedan todavía por aclarar la interferencia entre la convección a gran escala, asociada con ese movimiento, y los cilindros longitudinales convectivos.



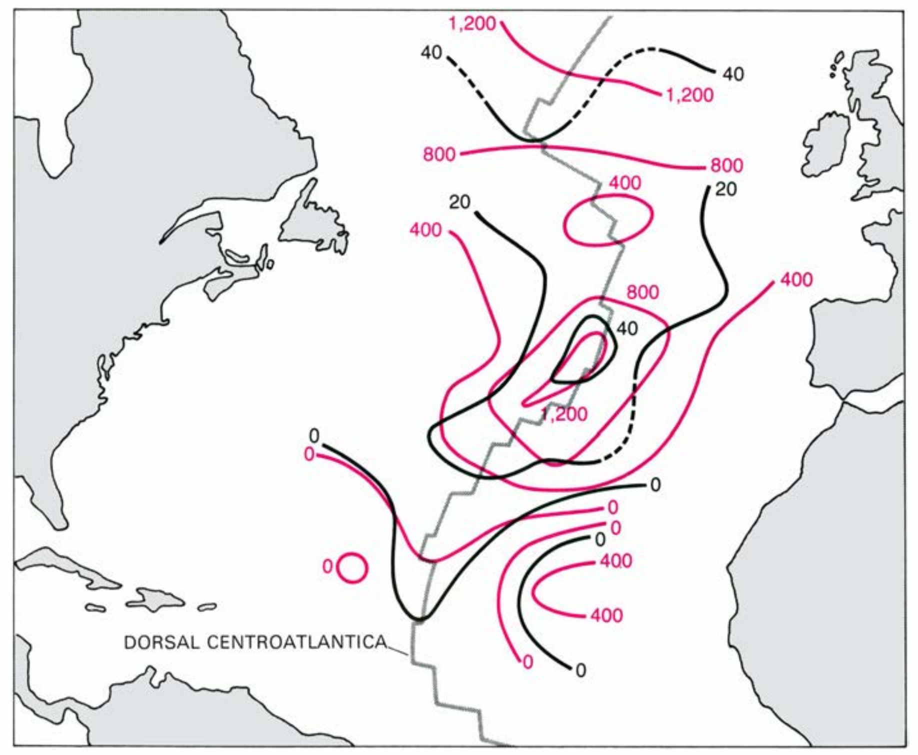
OTRO MODELO DE CONVECCION en el manto puede explicar la formación de cadenas de volcanes en los que la localización de vulcanismo activo no se mueva tan rápidamente como las placas. Este diagrama intenta mostrar solamente las células convectivas a pequeña escala, omitiéndose la circulación a gran escala. Los flujos a pequeña escala están algo desacoplados respecto a las placas debido a una franja delgada y de baja viscosidad que puede estar parcialmente fundida. Una parte del calor necesario para activar la circulación a pequeña escala proviene del manto inferior y otra procede de la desintegración de los isótopos radiactivos existentes en la propia franja. Al disminuir la viscosidad con la temperatura, el calor procedente de abajo produce surtidores ascendentes y relativamente delgados de material caliente. El calentamiento interno origina láminas y surtidores fríos descendentes que dominan todo el flujo. Debido al desacoplamiento de la capa, los surtidores ascendentes pueden entrar en erupción en forma de volcanes activos que no se mueven al mismo tiempo que la placa mientras que los conos de lava de los volcanes extinguidos sí lo hacen.

les provocan la separación de las placas en las dorsales centrooceánicas; pero más importante todavía es el hundimiento de las placas (frías y densas) en el manto, que urgiría su desplazamiento hacia las fosas.

Apenas existen pruebas directas del flujo a pequeña escala que se registra en el manto. Si las placas y el manto no están desacoplados, debajo de las placas cuyo movimiento sea rápido los flujos deberían adquirir la forma de cilindros en rotación. Si es una capa de baja viscosidad la que facilita el desacoplamiento, es de esperar que el flujo a pequeña escala sea tridimensional y complicado y que se reduzca a materiales calientes ascendentes y a materiales fríos descendentes en forma de surtidores y láminas. Puesto que aproximadamente la mitad del calor convectivo de la capa llega por conducción a través de la base de esta última, y la otra mitad procede de su interior, cabe suponer la existencia de más regiones descendentes que ascendentes; y, también, que la variación en viscosidad debida a la temperatura determine que los flujos ascendentes sean más estrechos que los descendentes.



LA PROFUNDIDAD DEL OCEANO aumenta la edad del fondo marino debido a la contracción térmica que se produce al enfriarse la placa a partir de una temperatura elevada y uniforme (la que tiene en el eje de la dorsal centrooceánica). Si el enfriamiento hubiera continuado uniformemente con la edad, a medida que la placa se alejaba de la dorsal, la profundidad del océano seguiría la curva de trazos. Sin embargo, la medición de profundidad real nos da la curva de trazo continuo, lo cual está de acuerdo con el enfriamiento de una placa de 120 kilómetros de espesor cuya base se encuentra a una temperatura de 1200° C.



PROFUNDIDAD DEL ATLANTICO NORTE en metros *(color)* después de sustraer el efecto de enfriamiento de la placa con el paso del tiempo. Las líneas negras dibujan las curvas isoanómalas del campo gravitatorio, en miligals. Las variaciones de estas dos características parecen estar estrechamente relacionadas y podrían ser una prueba de la existencia de una región en la que el material caliente del manto sube por corrientes de convección a pequeña escala. Ni la profundidad del océano ni el campo gravitatorio parecen tener relación con la dorsal controatlántica *(gris)*, donde la placa norteamericana y la euroasiática se separan.

Los intentos en pro del descubrimiento de la convección a pequeña escala sólo han conseguido un éxito secundario. No todos los geofísicos aceptan las anomalías gravitatorias y las variaciones de profundidad como pruebas convincentes de la existencia de un flujo a pequeña escala, aunque haya buenos indicios para creer en un transporte de calor por convección, además del que está directamente asociado con los movimientos de las placas. El aumento en profundidad del océano, correlativo con el incremento en edad de la placa presente en el fondo, concuerda estrechamente con la subsidencia calculada para una placa de unos 120 kilómetros de espesor. Si el manto que hay por debajo de esos 120 kilómetros pudiera enfriarse por conducción, las partes más antiguas del Atlántico y del Pacífico tendrían aproximadamente 1 kilómetro más de profundidad de la que realmente tienen. Puede impedirse un enfriamiento de este tipo únicamente cuando el calor se transporta hasta la base de la placa por convección. Sin embargo, las observaciones sobre las profundidades oceánicas no proporcionan información alguna acerca del dispositivo funcional de la supuesta convección. Aunque parece probable que la convección a pequeña escala del tipo que hemos descrito sea la responsable de ello, cualquier forma de transporte convectivo de calor podría explicar las observaciones registradas.

Existe otro conjunto de observaciones que nos proporcionan pruebas del desacoplamiento y de la convección a pequeña escala: las cadenas de volcanes que formaban alineaciones de crestas en ciertos lugares de las profundidades oceánicas. El ejemplo mejor conocido es el correspondiente a las islas Hawai, en el Pacífico. Los dos volcanes actualmente activos se encuentran en las islas Hawai, en la terminación sudoriental de la cresta. Las rocas volcánicas que forman esta última aumentan regularmente en edad con la distancia a la isla. Existen

varias crestas en el océano Indico y en el océano Atlántico que se parecen a las de las islas Hawai.

Lo interesante en este tipo de vulcanismo es que el movimiento de un emplazamiento activo con respecto a otro, igualmente activo, representa sólo uno o dos centímetros por año mientras que la traslación de una placa con respecto a otra es de más de 10 centímetros para el mismo período. Estas medidas indican que la fuente de lava volcánica se encuentra debajo de las placas y que no se mueve con ellas. Según este punto de vista, los volcanes son la expresión superficial de surtidores de materiales calientes que ascienden a la superficie desde las profundidades, esto es, de la base del manto.

La principal objeción a este concepto proviene de los modelos, construidos mediante computadores, sobre el comportamiento de fluidos calentados desde su propio interior. Estas experiencias demuestran que, aunque se generan surtidores fríos descendentes, los ascendentes y calientes nunca llegan a producirse.

Sin embargo, esta dificultad no surge si la convección queda confinada en los 700 kilómetros superiores del manto. Puesto que esta región se calienta tanto desde abajo como desde su interior, los surtidores calientes deberían poder formarse en ella. Además, estos surtidores no se moverán con las placas, ya que están desacopladas. De acuerdo con las experiencias de laboratorio cabría esperar que la convección a pequeña escala dependiera del tiempo. Así pues, no es sorprendente que exista un cierto movimiento de retardo en los surtidores que han producido los volcanes de las cadenas oceánicas. Sería de desear tener a mano mayor información sobre la forma del flujo a pequeña escala, pero resulta alentador poder explicar todas las observaciones geofísicas importantes con un modelo basado en experiencias de laboratorio. La nuda realidad es que las observaciones realizadas, consideradas en bloque, son insuficientes. Sin embargo, gracias a los recientes avances en el campo de las mediciones de la gravedad terrestre, realizadas desde satélites, nuestro conocimiento de las anomalías gravitatorias suboceánicas habrá de aumentar rápidamente durante los próximos años. También son posibles experiencias de laboratorio con números de Rayleigh grandes (10^6 a 10^7) y números de Reynolds pequeños y, aunque cueste realizarlas, favorecerán la comprensión de las detecciones registradas por los satélites.

Células visuales en el puente cerebral

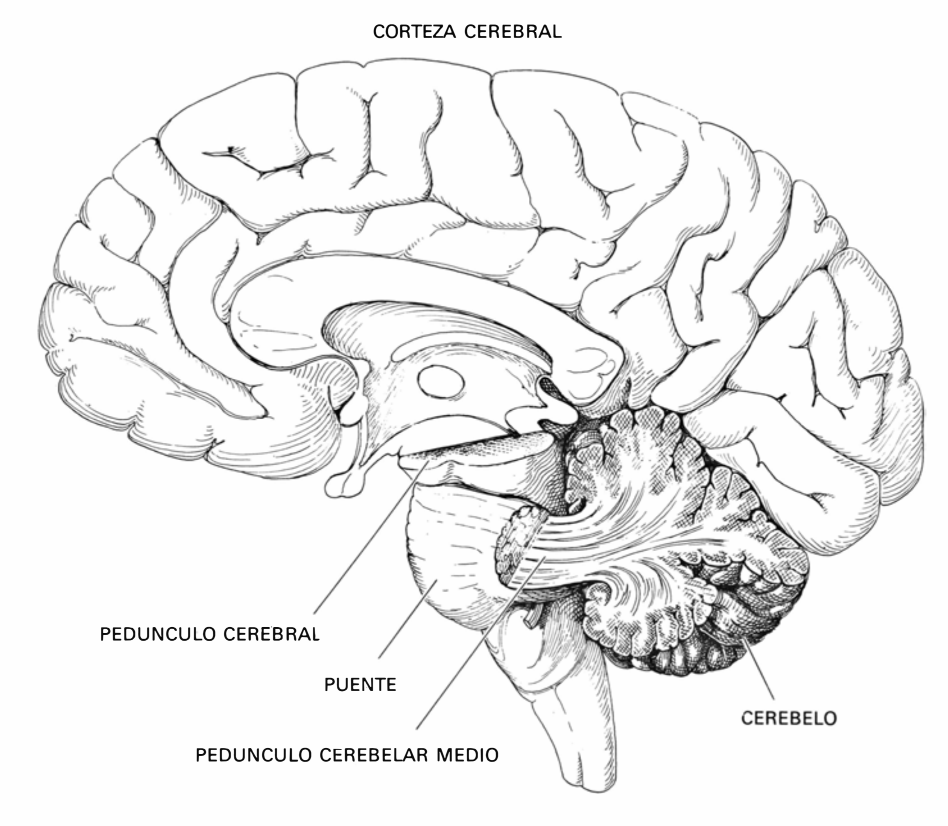
Las células de la protuberancia, en la base del cerebro, actúan como relés en el circuito que conecta los ojos y los músculos para coordinar los movimientos del cuerpo

Mitchell Glickstein y Alan R. Gibson

Los actos que requieren una estrecha coordinación entre los ojos y las extremidades, como agarrar una pelota en el caso del hombre o, para un gato, cazar una rata, precisan de la actividad combinada de los centros visuales y de los centros motores del cerebro. En los mamíferos, estos centros se hallan localizados en regiones concretas de la corteza cerebral, la gran lámina plegada de células nerviosas que forma la mayor parte del cerebro. El área visual se encuentra en la región posterior de la corteza; la estimulación eléctrica de esta área produce sensación de luz, y las células de la corteza visual pueden ser activadas selectivamente presentando al ojo estímulos visuales. Fruto de la misma señal, la estimulación del área motora en la región posterior de la corteza produce contracción muscular, siendo así como la actividad de las células de esta región aumenta en el tiempo inmediatamente anterior al movimiento muscular. ¿Cómo interaccionan las cortezas visual y motora para coordinar los movimientos de las extremidades? ¿Qué tipo de conexiones existen entre ellas?

La corteza cerebral, al igual que el resto del cerebro, está formada por miles de millones de unidades: las células nerviosas o neuronas, además de sus células anexas. Existen muchos tipos distintos de neuronas, en tamaño y en forma, y la mayoría poseen un complejo y ramificado sistema de fibras, las dendritas, además de una fibra larga única, el axón. A través del axón, la neurona transmite mensajes a otra célula nerviosa, en forma de impulso electroquímico. El extremo distal del axón contacta con una dendrita o un cuerpo celular de otra neurona; esta unión especializada a través de la cual se transmite el impulso es la sinapsis. La sinapsis permite el paso de información en un solo sentido, y las células nerviosas están organizadas en circuitos por sus conexiones sinápticas.

Nuestro conocimiento actual de las conexiones en los circuitos neurales en las regiones visual y motora de la corteza cerebral es escaso, pero aún así es posible identificar como mínimo tres vías anatómicas por las cuales pueden estar conectadas. Una de estas vías es enteramente cortical: la información de la corteza visual pasa a través de las áreas visuales de asociación, en las cuales es procesada, para luego alcanzar la corteza motora. Las otras dos vías salen de la corteza motora para volver luego; una vía, a través



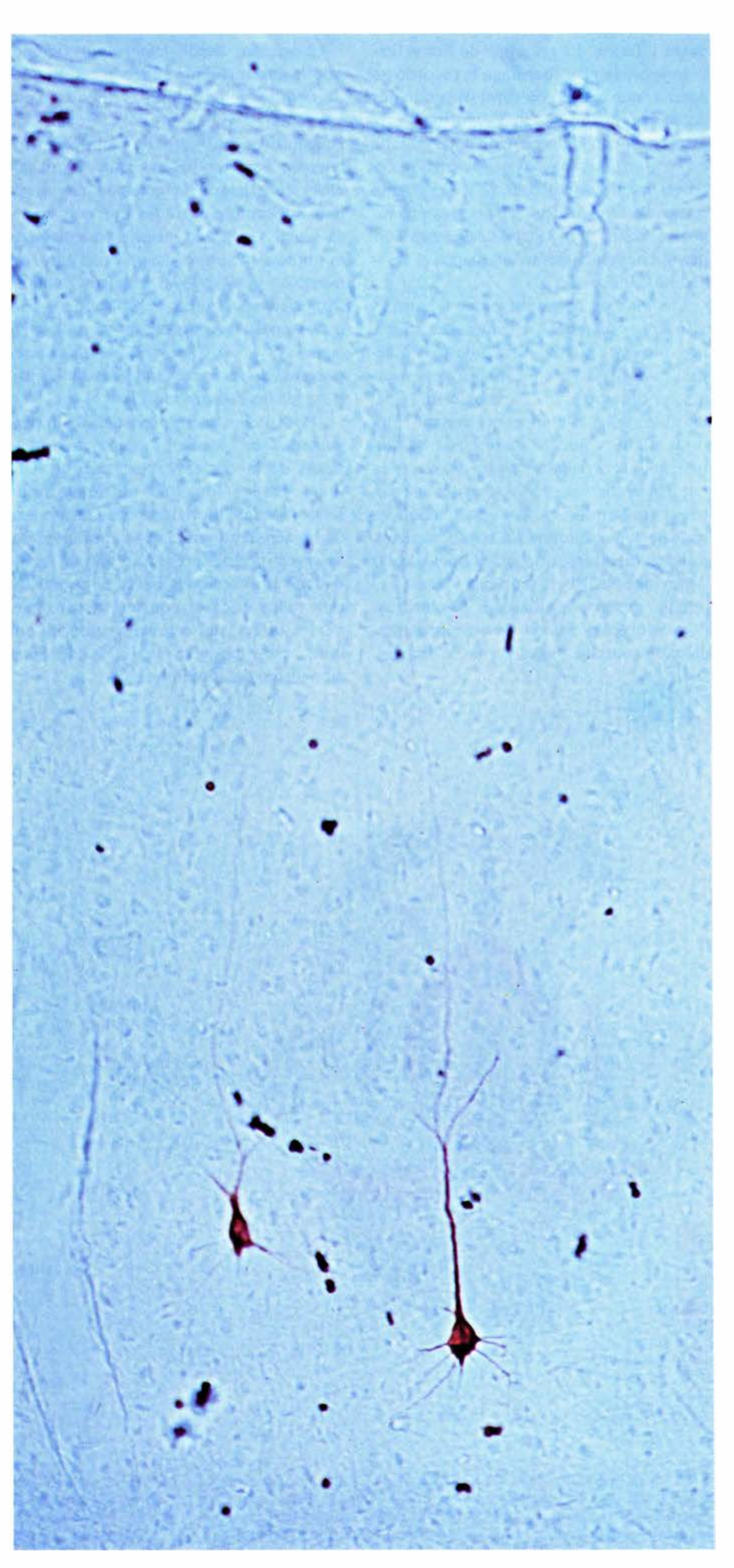
EL PUENTE DEL CEREBRO HUMANO fue descrito por primera vez en el siglo XVI por el anatomista italiano Constanzo Varolio, a quien esta estructura le recordó un puente ("pons" en latín) tendido sobre el tallo cerebral. Los pedúnculos cerebrales contienen fibras originadas en la corteza cerebral que se proyectan hacia el puente. De aquí, a través de la región central de los pedúnculos cerebelares, se dirigen al cerebelo, donde se combinan la información sensorial y motora, para, mediante influjos eléctricos, accionar cualesquiera movimientos de las extremidades.

de los ganglios de la base, y, la otra, por el cerebelo, el "pequeño" cerebro encargado de la coordinación del sistema motor.

Esta última vía es de particular interés ya que, si bien se conoce bastante el funcionamiento interno de la corteza visual y del cerebelo, no ocurre lo mismo con las conexiones entre estas dos regiones. Junto con nuestros colegas de la Brown University y de la Universidad de Oxford, hemos venido estudiando el primer relé de la vía que, partiendo de la corteza visual, llega a la corteza motora pasando por el cerebelo, circuito que parece ser uno de los más importantes para la coordinación visual del movimiento.

Los primeros investigadores pensaban que únicamente la corteza visual emitía fibras al cerebelo; pero hace aproximadamente 25 años, Ray S. Snider, que por entonces trabajaba en la Northwestern University, puso de manifiesto la entrada de estímulos visuales al cerebelo, al observar que destellos de luz producían la formación de potenciales en el vermis, la parte más central de la corteza cerebelar. Trabajos posteriores han confirmado los resultados de Snider, y han demostrado que, en animales de experimentación ligeramente anestesiados, un destello brillante puede provocar potenciales prácticamente en toda la corteza cerebral. Las informaciones visuales en el cerebelo son relevadas a través de la corteza visual y del colículo superior, estructura visual del cerebro medio.

Las conexiones entre la corteza visual y el cerebelo forman parte de un sistema denso de fibras que comprende fibras eferentes de casi todas las regiones corticales. Las fibras corticales eferentes no van al cerebelo directamente, sino que son relevadas en la protuberancia de la base del cerebro. Esta estructura fue descrita en el siglo XVI por el anatomista italiano Constanzo Varolio, que fue el primero en diseccionar el cerebro por su



CELULAS CORTICOPONTINAS (células de la corteza visual del cerebro que emiten fibras hasta el puente), teñidas selectivamente de color pardorrojizo mediante la técnica de la peroxidasa de rábano. Esta microfotografía muestra una sección, de 1,5 mm de profundidad, en la corteza visual del gato; la línea superior es la superficie cerebral. Algunas de las fibras provenientes de las dos células teñidas se aprecian claramente, pero las fibras simples que conectan las células con el puente son demasiado finas para visualizarse a este aumento. Las células corticopontinas son poco numerosas y se limitan a una capa profunda de la corteza.

parte inferior. El gran haz de fibras tendido sobre la protuberancia le recordó un puente, con el tallo cerebral fluyendo por debajo como un canal, y bautizó a esta estructura con el nombre de pons, puente en latín. En los mamíferos de corteza cerebral bien desarrollada, tanto el puente como el cerebelo son estructuras prominentes; estas tres estructuras están sorprendentemente desarrolladas en el cerebro humano.

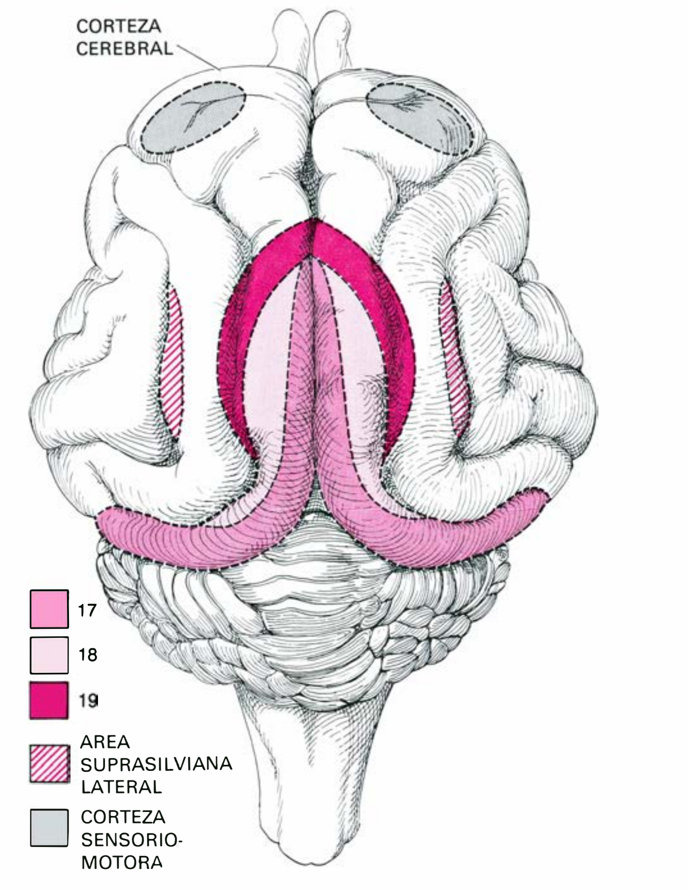
Las vías de conexión entre la corteza visual y el cerebelo a través del puente nos interesó, así como a nuestros colegas, por varias razones. La primera, porque al desempeñar el cerebelo un papel importante en el control del movimiento, presentíamos que el análisis de sus informaciones visuales podía desvelar la naturaleza de uno de los mayores circuitos involucrados en la coordinación visual de la motilidad. La segunda razón, porque creíamos que el examen de las conexiones entre la corteza visual y el puente podría ayudarnos a clarificar otro problema relativo a la representación del mundo visual en la corteza visual.

Es sabido, desde hace algún tiempo, que la luz incidente sobre la retina queda codificada en impulsos nerviosos por las células retinianas y esta información transmitida, por el nervio óptico, a los cuerpos geniculados externos. Estos núcleos constituyen la estación de relevo más importante entre los ojos y la corteza visual. Cada uno recibe información de la mitad del campo visual. En el gato, los cuerpos geniculados externos emiten proyecciones a varias regiones de la corteza visual entre las cuales se hallan las Areas 17 y 18. Cada área da lugar a representaciones independientes de las mitades de los campos visuales.

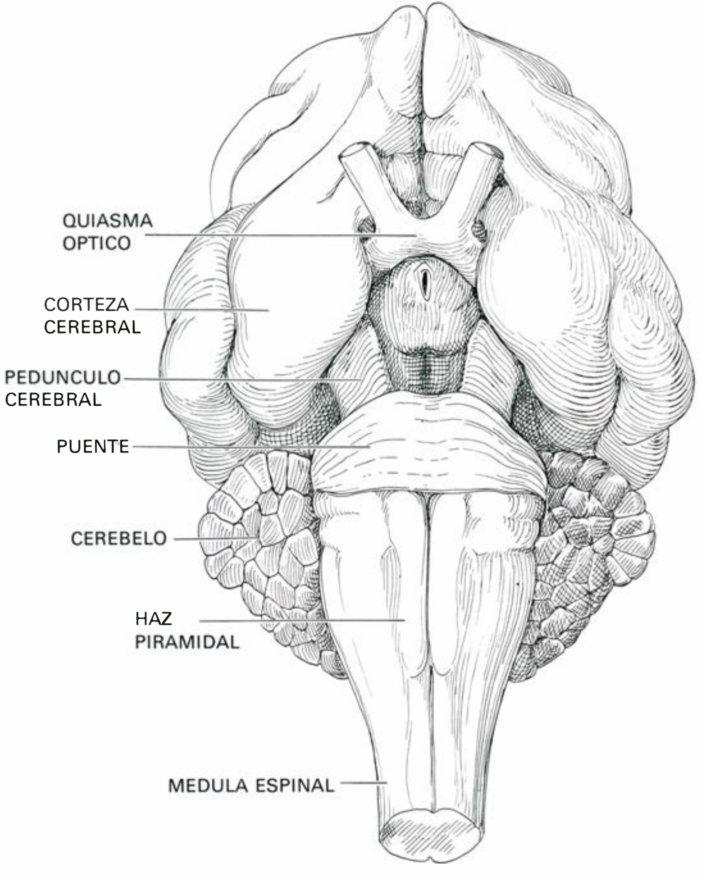
¿Por qué los campos visuales son proyectados en paralelo a dos áreas distintas de la corteza? Pues porque éstas áreas poseen funciones distintas, reflejándose estas diferencias en la naturaleza de las señales de salida. Así, por ejemplo, un área podría presentar mayor cantidad de proyecciones hacia el puente. Si éste fuera el caso, podrían existir conexiones directas al cerebelo y podría, por tanto, estar especializada en la coordinación visual del movimiento.

Nuestro primer objetivo fue conocer cuáles eran las áreas principales de la corteza visual que se proyectan en el puente y a qué células pertenecen las fibras que terminan allí. Una vez encontrado un grupo de células del puente receptoras de informaciones visuales, pudimos pasar el examen de su función.

Una técnica utilizada en neuroanatomía es la basada en el hecho de que el axón de una neurona degenera rápidamente si su cuerpo celular se destruye. El camino recorrido por las fibras que van de una zona cerebral a otra puede, pues, ser identificado mediante destrucción de cuerpos celulares de una región e identificando el camino seguido por la degeneración hasta el área-blanco (de proyección). En una serie de experimentos con gatos anestesiados, Richard A. King, John F. Stein y nosotros, lesionamos las zonas de las Areas 17 o 18 que recibían informaciones desde el centro del campo visual. Diez días después, los gatos eran anestesiados de nuevo y sus cerebros extirpados y fijados para obtener una serie de cortes. Nuestro histólogo, Eileen D. LaBossière se encargó luego



VISTA SUPERIOR DEL CEREBRO de un gato que muestra las áreas visual y sensitivomotoras de la corteza cerebral. Cada una de las cuatro áreas visuales de cada hemisferio recibe representaciones independientes de la mitad de los campos visuales que afectan a dichas áreas.



VISTA INFERIOR DEL CEREBRO de un gato que muestra el emplazamiento del puente y del cerebelo *(áreas ligeramente coloreadas)*. La información procedente de la corteza visual atraviesa el siguiente recorrido: del puente al cerebelo antes de volver a la corteza motora.

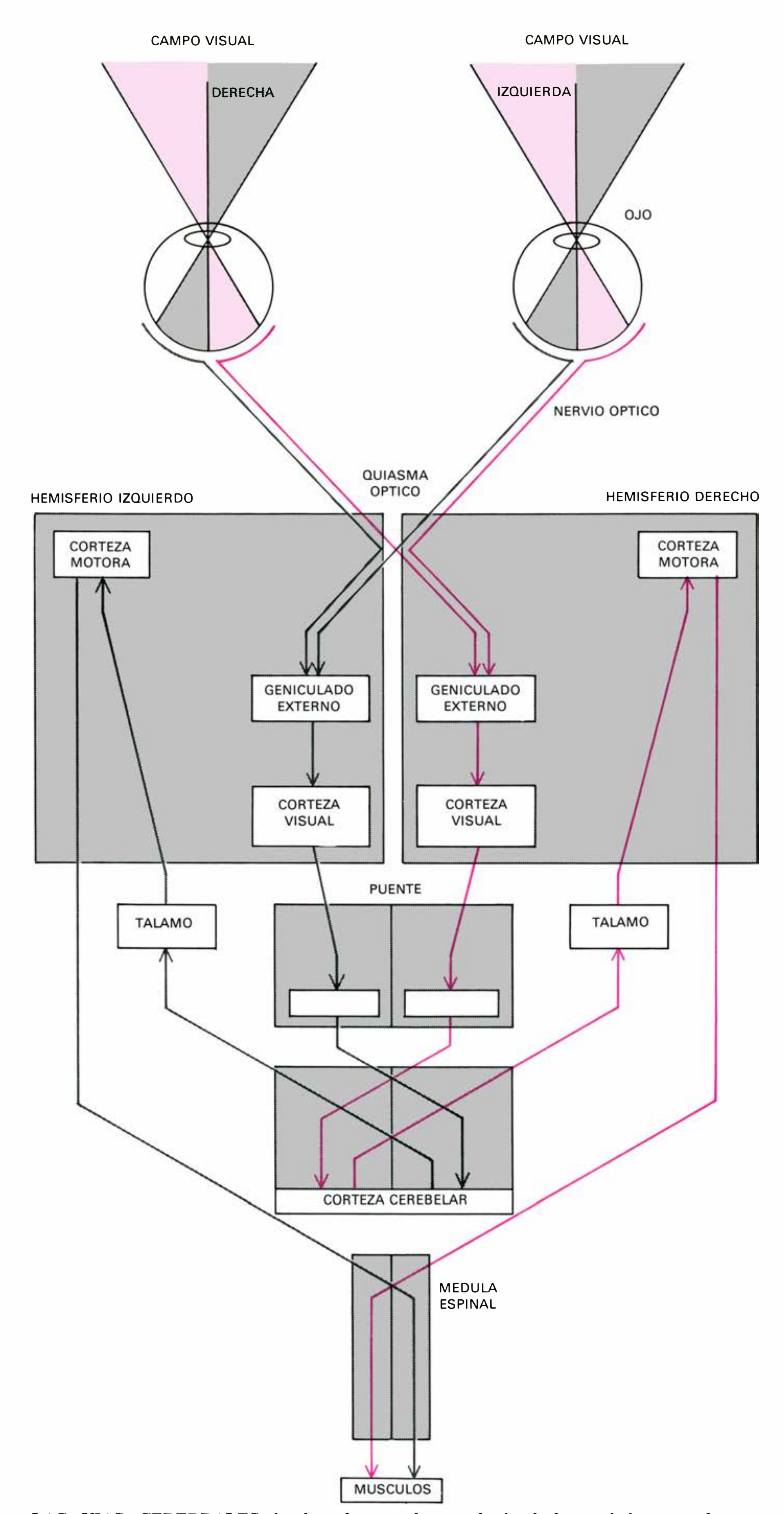
de la tinción de los cortes siguiendo la técnica de Nauta de la plata reducida para así localizar las fibras degeneradas provenientes de la corteza visual.

Cuando las lesiones eran del Area 18, aparecía claramente un foco de degeneración entre un grupo de células del puente. Las lesiones en la zona correspondiente del Area 17, sin embargo, causaban tan sólo un efecto despreciable de degeneración en el puente, lo que daba a entender que ambas zonas corticales funcionarían de distinta forma. Esta hipótesis se vio reforzada cuando Per Brodal, del Instituto de Anatomía de Oslo, descubrió que, en el puente, la entrada de información desde el Area 17 se reducía a la emitida por las partes del área que la recibían de la periferia del campo visual.

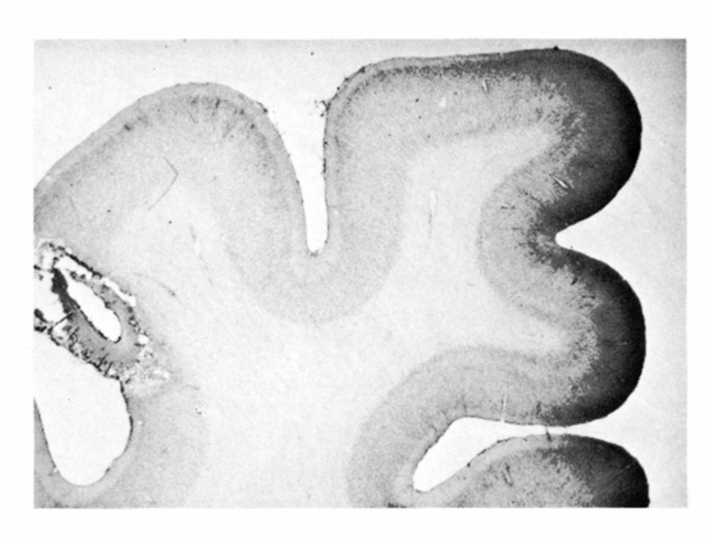
La corteza cerebral de gato presenta otras dos zonas visuales. Una de ellas, el Area 19, continua con la 18; la otra, el área lateral suprasilviana, se halla cerca de las restantes áreas visuales, de las que está separada lateralmente. Las cuatro regiones de la corteza visual reciben directamente información de los ojos a través de los cuerpos geniculados externos.

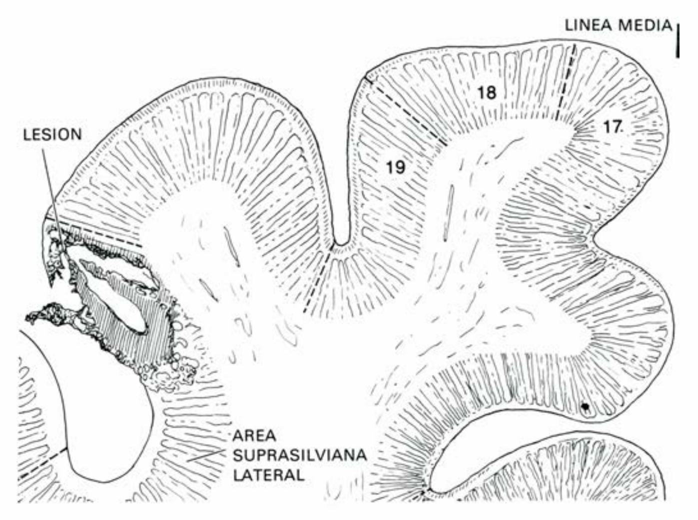
James F. Baker, LaBossière y nosotros mismos emprendimos un segundo estudio anatómico para determinar si las Areas 19 y suprasilviana lateral también mandaban información hacia el puente. Vimos que las proyecciones emitidas desde el Area 19 eran escasas, mientras que el área suprasilviana lateral se proyectaba más densamente en la misma región del puente en que lo hacía el Area 18. Estas dos regiones de la corteza pueden hallarse, pues, especializadas en el control visual de los movimientos y desempeñar un papel menos importante en la percepción visual de formas.

Los resultados obtenidos a partir de estudios de degeneración se han confirmado y ampliado recientemente gracias a otra técnica anatómica. Ciertos enzimas (como la peroxidasa extraída de rábanos), inyectados en el tejido cerebral, pasan al interior de los axones en su extremidad distal y son transportados hasta el cuerpo celular. Si los cuerpos celulares que contienen peroxidasa extraída de rábanos son tratados con diaminobenzidina, se produce un compuesto pardo obscuro que permite identificar a las células cuyos axones se proyecten en el área donde se ha inyectado el enzima. Con esta técnica, Baker, George D. Mower y nosotros mismos, pudimos recorrer el camino seguido entre el puente y la corteza visual, en sentido opuesto al



LAS VIAS CEREBRALES involucradas en el control visual de movimiento quedan señaladas en este diagrama. La información de medio campo visual de cada ojo va al quiasma óptico y se dirige, por separado, al cuerpo geniculado externo y hasta la corteza visual, en el hemisferio cerebral opuesto. Las áreas visuales de cada hemisferio se proyectan luego al mismo lado del puente, y las vías se vuelven a cruzar en el cerebelo y la médula espinal.



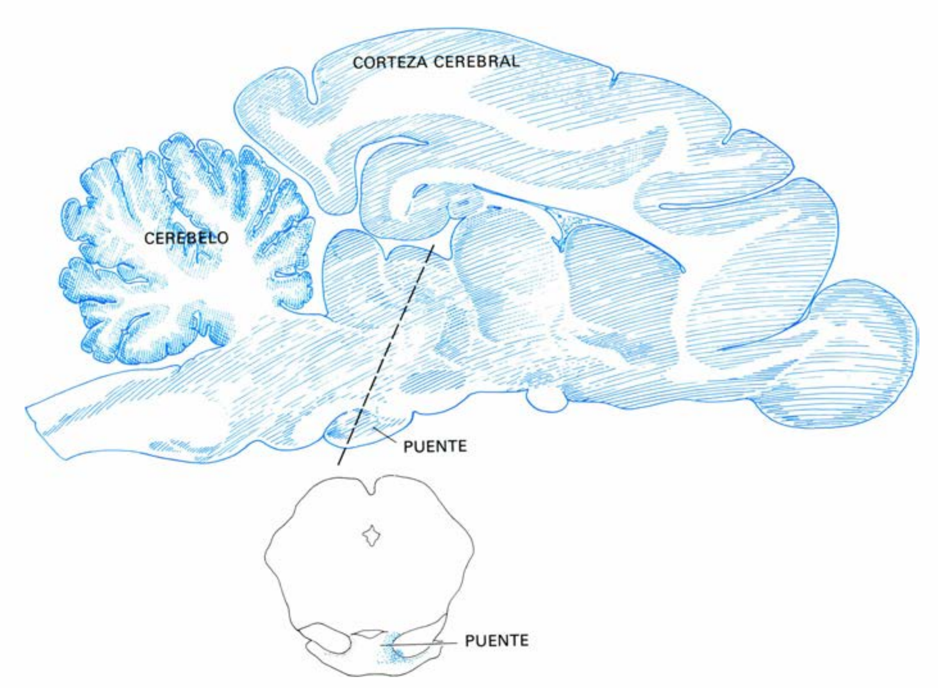


MICROFOTOGRAFIA DE UNA SECCION mediana del área suprasilviana lateral de la corteza visual de gato después de una lesión experimental. La lesión destruye neuronas de una zona del área visual de la corteza, lo que conduce a la degeneración de las fibras, algunas de las cuales se proyectan en las células visuales del puente. Las fibras degeneradas pueden ser identificadas selectivamente mediante la tinción de Nauta, siendo esta técnica un poderoso instrumento para la identificación de vías de conexión entre la corteza y el puente.

LAS FIBRAS DEGENERADAS de células corticopontinas, resultado de lesiones en la corteza visual, aparecen como líneas negras, irregulares y fragmentadas, en la microfotografía de un corte fino del puente. Las fibras han sido teñidas con la técnica de la plata de Nauta.

trazado mediante el método de la degeneración.

Recurriendo a la incisión quirúrgica, pusimos al descubierto la superficie inferior del puente en gatos, e inyectamos pequeñas cantidades de peroxidasa extraída de rábanos en su área visual. Al abordar el puente por la parte inferior, evitamos la posibilidad de verter accidentalmente enzima en otras estructuras que también podrían recibir fibras corticales. Al observar al microscopio, cortes sin teñir de estos cerebros de gato, pudimos observar que, exceptuando la región central del Area 17, grandes células piramidales de todas las áreas visuales corticales habían reaccionado en presencia de la peroxidasa. Las células marcadas pertenecían a una capa profunda de la corteza conocida por ser la responsable de la mayoría de estímulos dirigidos a las estructuras cerebrales inferiores. Estas células envían información visual al puente.

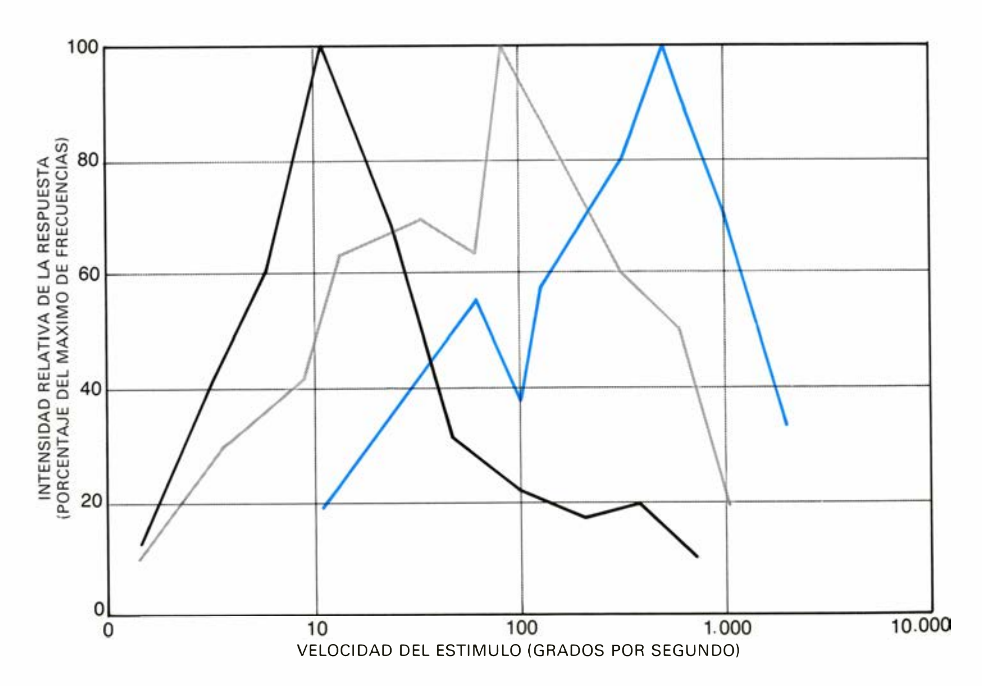


FOCOS DE DEGENERACION en el puente, producidos por lesiones experimentales en dos áreas de la corteza visual de gato, identificados en un esquema de una sección frontal del puente. El punteado negro muestra el área de degeneración debida a lesión en el Area 18; el punteado de color representa la degeneración producida por lesión en el área suprasilviana lateral del hemisferio opuesto. Las áreas visuales de cada hemisferio se proyectan en las zonas de solapamiento de cada lado del puente; sólo se aprecia un área de degeneración.

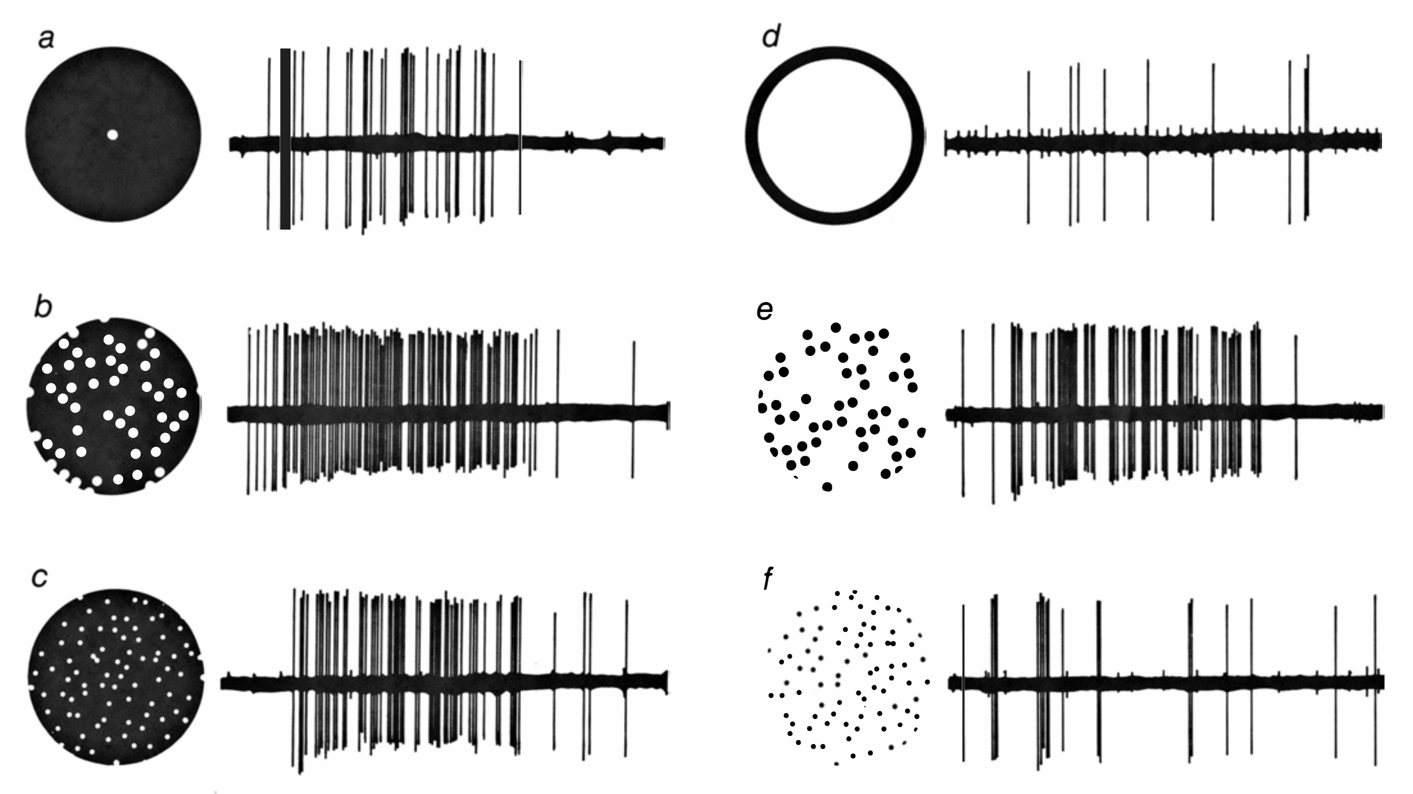
Habiendo ya localizado un conjunto de células del puente que recibía fibras de las células de la corteza visual, el paso siguiente era observar si éstas células pontinas podían ser estimuladas fisiológicamente mediante un estímulo visual. Una neurona transmite información en forma de breves impulsos electroquímicos, de tal manera que se pueden detectar las respuestas a estímulos sensoriales mediante finos electrodos registradores. Los impulsos en una neurona o en una fibra nerviosa entera tienen la misma amplitud; la eficacia de un estímulo que las pone en funcionamiento se refleja en la frecuencia de "espigas", o impulsos, y no en su amplitud, frecuencia aquella que puede observarse mediante un osciloscopio. En general, cuanto más potente es el estímulo, mayor número de espigas por segundo se registran.

En nuestros experimentos de fisiología, Baker, Stein y nosotros registramos la actividad de neuromas anestesiados. la actividad de neuronas sencillas en el puente de gatos, sin lesiones y ligeramente anestesiados.

Puesta al descubierto la superficie del cerebro implantamos microelectrodos de tungsteno en el puente, mediante un dispositivo estereotáxico (que permite su colocación gracias a un sistema de coordenadas tridimensionales). Al implantar los microelectrodos en la región del puente que recibe fibras de la corteza visual, todas las células afectadas respondieron a la estimulación visual con un incremento de su frecuencia de descargas. Las células que responden a estímulos visuales también pueden ser activadas mediante estimulación eléctrica de la corteza visual. Al tocar una célula del puente que podía ser activada por estímulos visuales, penetrando más profundamente con el microelectrodo, resulta que la siguiente célula afectada podía generalmente ser activada por el mismo estímulo. Por otra parte, al avanzar el electrodo por el puente a una posición inmediatamente adyacente a la línea anterior, detectábamos, en general, y a profundidad parecida, células visuales. Otras células exteriores a una cierta área definida del puente, no respondían en



RESPUESTAS A ESTIMULOS DE VELOCIDAD de tres células visuales del puente: las células son sensibles a una amplia gama de velocidades de movimiento, desde una velocidad angular de pocos grados por segundo, hasta más de 1000 grados por segundo. Existe, sin embargo, una velocidad óptima para cada célula. Las respuestas se miden con un osciloscopio, contando el número de "espigas" por estímulo producido por cada velocidad, y presentando el conjunto de esta frecuencia como un porcentaje del máximo de disparos celular.



RESPUESTAS A BLANCOS VISUALES de una célula del puente, que demuestran la notable especificidad de estas células para distintas configuraciones de los blancos. La respuesta de la célula a cada estímulo visual se determina presentando el blanco en el campo visual y anotando el patrón de la actividad celular mediante un microelectrodo conectado a un osciloscopio. Los seis estímulos *(blancos)* producen respuesta, aunque el más eficaz para esta célula particular sea el del punteado blanco sobre negro, moviéndose en una dirección específica *(b).*

SEPARADOR DE ESTIMULOS
ESTIMULADOR
DISCRIMINADOR
OSCILOSCOPIO
AMPLIFICADOR
IMPULSO DISPARADOR
MICROELECTRODO REGISTRADOR
AREA 18
ESTIMULO
COLISION
ELECTRODO ESTIMULADOR BIPOLAR
PUENTE
ESTIMULACION VISUAL
OJO

LOS EXPERIMENTOS DE "INVASION" ANTIDROMICA permiten identificar a las células de la corteza visual que emiten fibras hasta el puente, mediante estimulación eléctrica de las terminaciones de los nervios en el área visual del puente y detección de los impulsos conducidos antidrómicamente (retrógrados) hasta los cuerpos celulares de la corteza. Para asegurarse de que la fibra y el cuerpo celular pertenecen a la misma célula y que no se interpone ninguna sinapsis, la célula que se investiga puede ser estimulada visualmente. La señal producida es ampliada y utilizada para disparar un estimulador que origina un impulso antidrómico en la terminación del nervio. Si la célula estimulada y la primera son una sola, los impulsos "chocarán" a la mitad, y aquél no llegará al cuerpo celular, y no se detectará.

absoluto a los estímulos visuales. Estas observaciones sugieren que las células visuales del puente se localizan en una región específica, exclusivamente visual.

En regiones vecinas del puente identificamos células que respondían a otros estímulos sensoriales, como golpes o estimulación táctil de la piel o el pelo de gato. Aunque no estudiamos las características de las respuestas de estas células en detalle, es de señalar que también las encontramos en distintas agrupaciones. Todas las células pontinas sometidas a exploración han respondido a una sola forma de estimulación sensorial, visual, auditiva o táctil; no hemos encontrado ninguna célula en la que converja información procedente de más de un órgano sensorial.

La mitad de las células visuales del puente estudiadas podía ser activada con un destello brillante, aunque éste no fuese en general el mejor estímulo. Sin embargo, la respuesta a los destellos permitía la medida precisa de la latencia de la activación, o sea, el tiempo transcurrido entre el destello y la primera espiga. Conociendo este tiempo, podíamos suponer cuál era la vía más corta por la que las células del puente reciben la información visual. Trece de las doscientas treinta y dos células exploradas eran activadas al cabo de un tiempo inferior o igual a 20 milisegundos transcurrido desde el destello. Este corto período de latencia es solamente suficiente para el paso de un impulso a través de un máximo de pocas sinapsis, en la corteza visual, en su ruta hacia el puente.

Conviene ahora saber qué tipo de información visual es transmitida al cerebelo a través del puente. Al objeto de responder a esta pregunta, proseguimos en el estudio de los campos receptores visuales del puente, o sea, de las regiones del campo visual en las cuales blancos visuales afectan la frecuencia de impulsos de las células visuales del puente. La magnitud de los campos receptores varía, desde los 3 o 4 grados, hasta un medio campo completo (la mitad del campo visual) y, por término medio, son más amplios que los de las células de la corteza visual. Una posible explicación para la existencia de estos campos tan amplios sería que las informaciones emitidas por varias células de la corteza visual, cada una con un pequeño y ligeramente distinto campo receptor, convergieran en una sola célula del puente.

Aunque las células visuales del puente reciben la información de la corteza visual, sus respuestas difieren significativamente de las respuestas procedentes de las células corticales. Prácticamente todas las células pontinas que exploramos emitían una respuesta máxima al movimiento del blanco en una dirección particular; en la mayoría de los casos, el movimiento del blanco en la dirección opuesta o bien no estimulaba la célula o bien la inhibía activamente. Nos centramos en la sensibilidad al movimiento por parte de algunas células; variando la velocidad del movimiento del blanco, medimos la efectividad de distintas velocidades para provocar descargas celulares. Las células del puente respondían a una amplia gama de velocidades del blanco, desde pocos grados por segundo hasta 1000 grados por segundo, ello sin perder su especificidad direccional, y aunque exista una velocidad óptima para cada célula. Este margen de velocidades es mayor que el de las células de la corteza visual, lo que sugiere de nuevo que varias células corticales, cada una con una velocidad tipo distinta, pueden converger en una sola célula del puente.

Dirección y velocidad son, pues, las determinantes más importantes de la frecuencia de impulsos de las células visuales del puente, siendo menos importantes, en general, la forma y la orientación de los blancos. Las células pontinas difieren, sin embargo, en su preferencia por blancos de distinta configuración y tamaño. Los blancos grandes multipuntuales fueron los estímulos más efectivos para la mitad de las células pontinas aproximadamente. Algunas células mostraban una fuerte preferencia por estos blancos, de tal forma que llegaban a no ser activadas por blancos puntuales. Respondían tanto a puntos negros sobre fondo blanco como a puntos blancos sobre fondo negro, aunque los puntos blancos eran, normalmente, más eficaces. Otras células pontinas reaccionaban más en presencia de un punto móvil. Existía un tamaño óptimo para el estímulo puntual; los blancos grandes no activaban, a menudo, las células. Para la mayoría de las células del puente, trazos o líneas orientadas no eran estímulos más efectivos que los puntuales, y a veces lo solían ser incluso menos. Este comportamiento contrasta con el de la mayoría de las células corticales, que responden ostentosamente ante estímulos lineales orientados, pero débilmente ante estímulos puntuales.

Las características de las respuestas de las células visuales pontinas pueden ayudarnos a comprender para qué tipo de información actúan de relé entre la corteza visual y el cerebelo. ¿Qué estímulos naturales pueden activar a estas células? Las células cuya respuesta preferencial es a puntos en movimiento podrían estar especializadas en seguir la velocidad y la dirección del movimiento de un objeto simple, que en el caso del gato puede ser un pequeño animal corriendo. Las que responden al movimiento de amplios campos complejos, prefieren el movimiento en la vertical y hacia abajo, por lo que serían responsables de detectar la dirección del suelo vista por el animal andando o corriendo.

Visto que el funcionamiento de las células visuales del puente difería mucho del hasta ahora observado en las células visuales corticales, decidimos estudiar el proceso que sufre la información en la corteza hasta originar un tipo de respuesta muy distinto en las células pontinas. Para abordar el problema, junto con Baker y Mower, consideramos la técnica conocida como de invasión antidrómica. Se trata de estimular eléctricamente las terminaciones de axones de células corticopontinas (células corticales que se proyectan sobre células del puente), de tal forma que el impulso es conducido por la fibra e invade el cuerpo celular. La conducción del impulso nervioso desde el extremo del axón al cuerpo celular es antidrómico, esto es, en sentido opuesto al usual. Si se coloca un microelectrodo para registrar el impulso nervioso en el cuerpo celular, se comprueba que la espiga llega unos pocos milisegundos después de la estimulación del axón (el tiempo exacto de propagación depende de la longitud y del diámetro del axón). Con este método se puede saber si el axón de una célula de la corteza visual va al puente y, en caso afirmativo, estudiar las propiedades de ésta célula.

Tan sólo un pequeño porcentaje de los millones de células de la corteza visual emiten axones a estructuras definidas del puente, lo que hace difícil la identificación de células corticopontinas. Para aumentar nuestras posibilidades de éxito trabajamos simultáneamente con cuatro electrodos en la corteza, conectándolos entre sí en cada estimulación; el estimulador era asimismo un conjunto de cuatro electrodos situados en el área visual del puente. Hasta ahora hemos podido identificar 57 células corticopontinas.

La estimulación eléctrica del puente puede producir impulsos en la corteza por dos vías distintas: directamente, por un impulso antidrómico a lo largo del axón, o indirectamente, por excitación de una célula intermedia que actúe de relé sináptico con la célula que se registra. Para poder diferenciar estas dos po-

sibilidades, exploramos cada célula por "colisión". Esto es, excitando la célula con una estimulación visual (como un blanco multipuntual), amplificando la espiga producida que se utilizará para disparar el estimulador que provoca, a su vez, una espiga antidrómica en el axón.

El circuito eléctrico externo opera casi instantáneamente, de tal forma que, si el cuerpo celular estimulado visualmente y el axón estimulado eléctricamente son de la misma neurona, la espiga antidrómica que sube por el axón desde el estimulador encontrará la espiga que baja, producto de la estimulación visual. Si esto ocurre, los dos estímulos "colisionan" y desaparecen, ya que cierta longitud del axón no es conductora hasta un tiempo después del paso del impulso. La espiga antidrómica no alcanza el cuerpo celular y no aparece en la pantalla del osciloscopio.

Un resultado sorprendente de los experimentos de invasión antidrómica es que las células corticopontinas comprenden un subconjunto de células corticales que se comportan más como células pontinas que como corticales. Gran parte de la convergencia que se precisa para producir los amplios campos receptores y las extensas gamas de velocidad, típicos de las células visuales pontinas, ocurre ya en la corteza. Una característica por la que se distinguen las células corticopontinas de las pontinas es que aquéllas son más sensibles a la orientación de un es- más sensibles a la orientación de un es- tímulo lineal. La orientación preferente para un estímulo lineal orientado no corresponde, sin embargo, con la dirección preferente para un estímulo puntual en movimiento, para la misma célula. Podría ser que la mayoría de estas células convergieran en una célula del puente, de tal manera que la especifidad direccional sea conservada aunque se pierda la orientación preferente.

En resumen, el movimiento de una imagen por la retina es necesario para activar una célula visual del puente, pero estas células no son altamente selectivas para estímulos de orientación o forma definidas. Ello sugiere que el análisis de los estímulos visuales es realizado por otras vías cerebrales. El movimiento de objetos ante un gato inmóvil y el movimiento del suelo ante un gato que pasa andando o corriendo, activan dos tipos distintos de células del puente. Esas células, por su parte, mandan impulsos hacia el cerebelo, que también registra la posición y la velocidad de cada músculo y articulación.

así ven INVESTIGACION Y CIENCIA

«Hace cierto tiempo, pensando en la necesidad de publicar una buena revista de divulgación científica en España, consulté con mi amigo y colega, el bioquímico Alberto Sols, acerca del mejor enfoque a tomar en tal proyecto. Alberto me contestó que lo más práctico sería traducir al español la mejor revista que existe en este campo, es decir, SCIENTIFIC AMERICAN. Afortunadamente, gracias a la Editorial Labor, esto ya es una realidad. Y también un gran acierto, porque la supervivencia del hombre en la tierra en los próximos siglos dependerá en gran parte de que éste reciba una buena formación científica y humanística.»





JUAN ORO

Profesor de la Universidad de Houston, director científico del Proyecto Vikingo de la NASA.

«Me complace enormemente la noticia de la publicación de INVESTIGACION Y CIENCIA, edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN, la revista de mayor prestigio en el mundo de la ciencia, sin otro norte que el avance de ésta y su incidencia en la vida del hombre. Qué duda cabe que ha de ser un vigoroso instrumento de progreso para los países de habla española.»



JOSEP TRUETA

Profesor Emérito de Cirugía de la Universidad de Oxford.

«Pienso que acaso la más radical de las deficiencias históricas del alma española sea la escasez de su formación científica, la carencia o la debilidad de los hábitos mentales en cuya virtud es posible hacer ciencia propia y estimar adecuadamente la que los demás han hecho. Mídase, pues, según esto, la importancia que atribuyo a la publicación de la revista INVESTIGACION Y CIENCIA. En ella veo un eficaz recurso para acercarnos al siglo XXI a la altura que éste va exigir a todos los hombres.»



PEDRO LAIN ENTRALGO

Catedrático de la Universidad de Madrid. Director del Instituto Arnau de Vilanova del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.



«Soy lector, desde hace muchos años, de SCIENTIFIC AMERICAN, que es modelo en el difícil arte de la divulgación científica de altura. Por ello, considero que INVESTIGACION Y CIENCIA contribuirá a crear el clima social que necesita el desarrollo de la investigación entre nosotros, dando a conocer además la gran tarea ya realizada por los científicos españoles e hispanoamericanos.»

EDUARDO PRIMO YUFERA

Presidente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.



«Tengo muchas razones para creer que la edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN va a representar un acontecimiento de real importancia en la vida intelectual española. Entre otras, el uso continuo que de SCIENTIFIC AMERICAN hacemos la mayoría de los que, sabiendo inglés, trabajamos en el campo de las ciencias humanas. La calidad y claridad de los trabajos, así como su amplia y actual temática, hacen de esa publicación una herramienta de trabajo en verdad indispensable, que ahora estará al alcance de todo el mundo.»

JOSE LUIS PINILLOS

Catedrático de Psicología de la Universidad Complutense, Madrid.

Hechurado de bandas metálicas

El comportamiento de un metal en el proceso de estampación es un tema de gran interés práctico. El conocimiento actual del estado sólido hace que el proceso sea cada vez menos fruto de un arte y más aplicación de una ciencia

S. S. Hecker y A. K. Ghosh

El visitante que entre en una fábrica en donde se esté hechurando bandas metálicas, con prensas de estampación de gran velocidad, a partir de láminas metálicas previamente cizalladas, puede muy bien creer que está observando una avanzada tecnología en acción. Realmente el hechurado de bandas metálicas es más que un arte avanzado. En la industria pesa mucho el criterio y la experiencia de los maestros artesanos. Sólo recientemente, merced a los progresos habidos en el terreno del análisis y del conocimiento de las estructuras atómicas de los metales, se ha empezado a fortalecer el arte con la ciencia, colocando la tecnología sobre una base más firme y trazando el camino para mejorar la fabricación y disminuir el coste de los miles de componentes metálicos que se construyen diariamente en los centros de producción.

Aunque las bandas metálicas se empleaban, hace ya miles de años, para fabricar monedas, utensilios y objetos de arte, hace sólo una centuria que el procedimiento se mecanizó y empezó a convertirse en las líneas de estampación metálica actual. La mecanización de la laminación fue, de hecho, el paso más importante de cara a una producción en serie. En nuestros días, la laminación de bandas satisface las necesidades de casi toda la industria estampadora, que produce una extensa gama de componentes, desde ojetes de zapatos a parachoques para automóviles. Esta industria es un componente mayoritario en la economía de cualquier país moderno industrializado.

A principios del siglo XVI, un inventor francés, que aparece en los anales del hechurado metálico con el nombre de Bruiler, desarrolló una técnica para laminar metales a un espesor uniforme. Este desarrollo permitió conformar componentes metálicos por estampación de piezas metálicas planas entre matrices. No obstante, y a lo largo de 300 años, el hierro y el acero continuaron conformándose predominantemente por laminación, forja, moldeo y embutición, porque las prensas empleadas para estampar componentes eran manuales; y ello hasta que, hacia 1800, los ingenieros alemanes Ludwig Keserstein y Johann Luber construyeron la primera prensa hidráulica. Cuando el inventor americano Elisha Root introdujo la primera prensa mecánica, hacia 1850, se abrió el camino para una revolución de las técnicas industriales.

El surgimiento de la producción en serie en la segunda mitad del siglo XIX fue un estímulo particular para el desarrollo de la laminación de bandas metálicas, lo cual, a su vez, facilitó producciones en serie en las industrias transformadoras. Los componentes fabricados a partir de bandas laminadas ofrecen varias ventajas sobre los moldeados y los forjados, entre las cuales está la disminución del peso, una mejor reproducibilidad y una reducción del coste. Hacia 1850, la práctica de la estampación de láminas de hierro o de acero estañados para fabricar recipientes destinados a contener alimentos inició la industria de laminación de bandas tal como se conoce hoy.

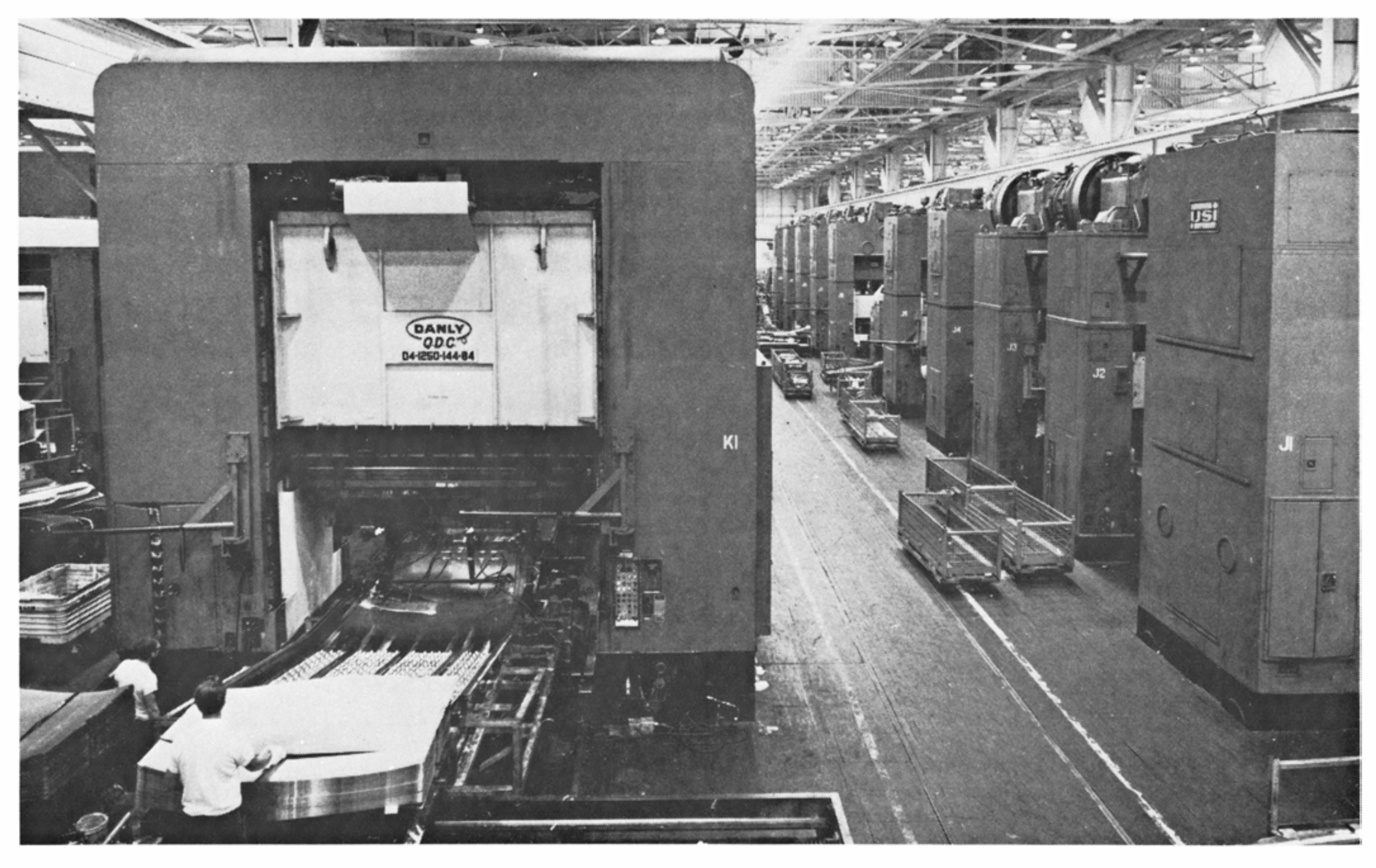
Aunque la estampación metálica quedó perfectamente establecida en 1900, el principal incremento de esta industria apareció cuando la producción en serie se convirtió en un rasgo característico de la industria del automóvil. Otro acicate lo constituyó la rápida expansión de la industria de los electrodomésticos, después de la Primera Guerra Mundial, como aspiradoras, lavadoras, neveras y tostadoras. Todos esos campos de progreso crearon una gran demanda de bandas metálicas. Estas necesidades se satisfacían con el empleo de acero suave, que ofrecía las ventajas de un espesor uniforme, buen acabado superficial y bajo coste. El acero suave se convirtió rápidamente en el material universal de las bandas, papel que todavía conserva.

La estampación no es de ninguna manera el único procedimiento de conformación de componentes a partir de bandas metálicas, pero económicamente es el más importante y, por lo tanto, será el objeto de nuestro análisis. En el sistema más corriente de estampación, un recorte de la lámina metálica se hechura en una prensa mecánica mediante un juego de matrices que han sido cuidadosamente conformadas para conseguir el componente deseado. El proceso empieza con una operación preliminar en la cual la banda metálica, que se almacena en bobinas (a veces pesan 30 tm), se desenrolla automáticamente y se corta al tamaño adecuado mediante cizallas. Este tamaño normalmente es superior al de la pieza acabada, para facilitar el hechurado de los bordes durante la estampación. Después de la estampación, se cortan las rebabas. En una estampación, las pérdidas por rebabas pueden ser del orden del 30 por ciento; el metal despuntado sólo se puede vender como chatarra, por tanto, mucho más barato que su precio de coste.

La etapa siguiente es el pestañado; suele ser una operación de doblado. La pestaña normalmente es necesaria si el componente está diseñado para ajustarse a otro, como por ejemplo, un parachoques en el cuerpo del automóvil. Después del pestañado, la pieza debe estamparse de nuevo en otro juego de matrices; esta etapa es, a veces, necesaria para conformar contornos y esquinas que, con el primer golpe estampador, no han alcanzado sus dimensiones predeterminadas.

Una planta de estampación típica utiliza una gran variedad de matrices y prensas. La presión puede aplicarse por sistemas hidráulicos o mecánicos, prefiriéndose los mecánicos porque son más

LOS ACUÑADOS DE LAMINA METALICA, que constituirán distintas partes de los automóviles, se almacenan en una planta de la General Motors Corporation. El metal es un acero suave. Estos acuñados se transportan a la nave adyacente de estampación, la cual aparece en la fotografía inferior. Allí hay recortes no acuñados y de tamaño apropiado, los cuales alimentan a grandes prensas que estampan los componentes.



LAS PRENSAS DE ESTAMPACION forman la nave de entrada en la planta de la General Motors. El metal se transporta automáticamente una vez el operador de la parte izquierda, al fondo de la fotografía, ha alimentado los cilindros con los recortes de lámina; aquéllos empujan a éstos hacia la prensa. Las máquinas representadas en la derecha de la presente ilustración también estampan componentes.

rápidos. Están muy generalizadas las prensas de doble efecto, que implican el desplazamiento de dos punzones, uno para sujetar el recorte de lámina y otro para la matriz principal. Las modernas líneas de estampación están suficiente o totalmente automatizadas, con brazos mecánicos para la alimentación y transporte de componentes, rociadores de lubricante sincronizados con el ciclo de la prensa, sistemas de transporte basados en mecanismos magnéticos o de vacío, fotocélulas que impulsan el sistema motor y un sistema de inspección que funciona, sin parar la línea de producción, para eliminar un componente. Como resultado se consiguen rendimientos de producción extremadamente elevados (100.000 envases de filtros de aceite por día en una planta sencilla).

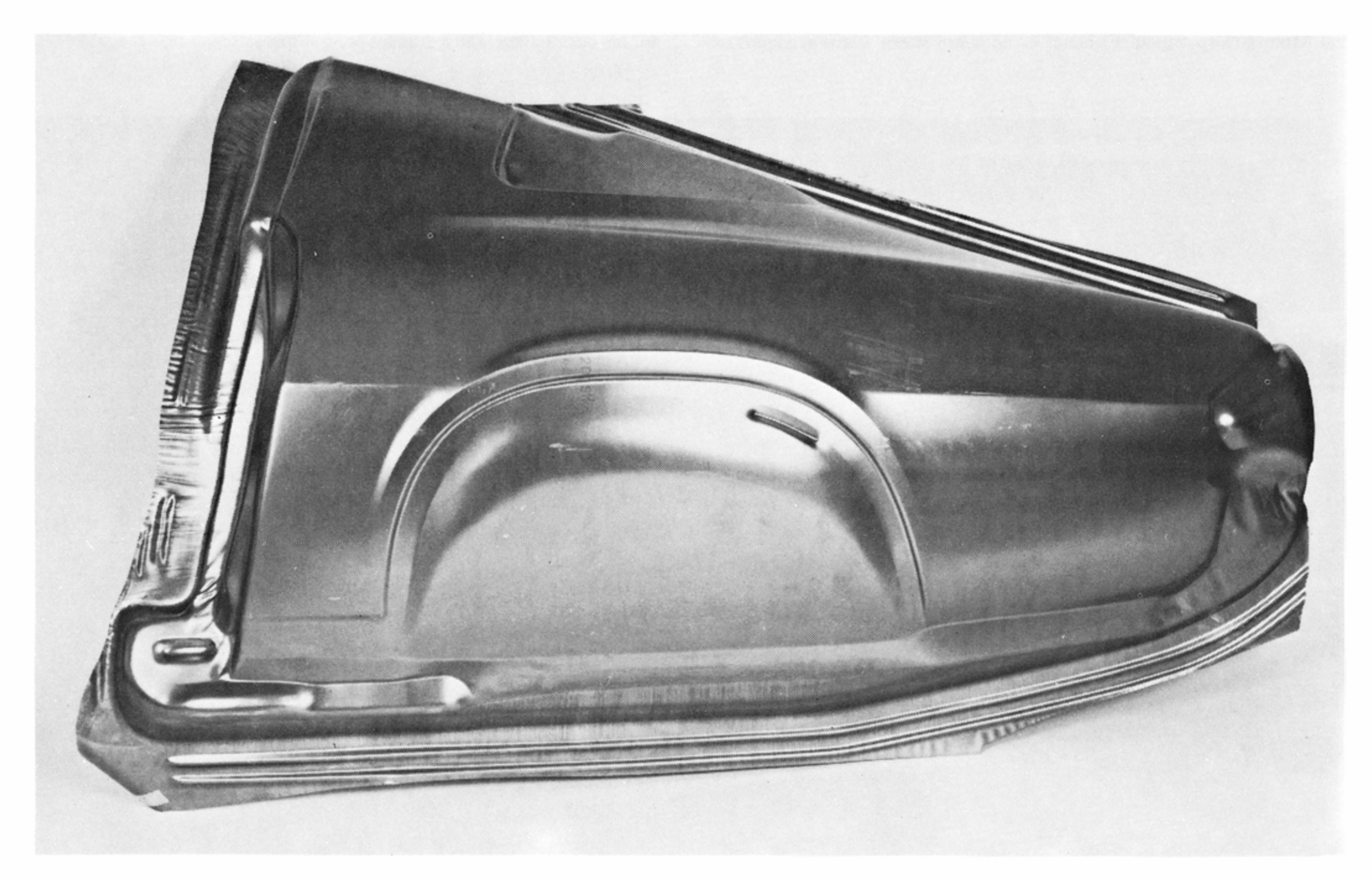
Las líneas automáticas de estampación estuvieron en funcionamiento mucho antes de conocerse qué tipo de deformación tiene lugar en un componente metálico al estamparse. Este conocimiento es totalmente reciente. Los procesos implicados son la embutición y (usualmente) la embutición con estirado. Se pueden seguir mediante la observación de una prensa preparada para estampar un recorte de lámina metálica. Encima del recorte de lámina se encuentran el martinete principal, que lleva el punzón, y la mordaza del recorte de lámina, que sujeta los bordes del recorte de lámina. Debajo del recorte está la matriz principal.

Como primera acción, la prensa empuja hacia abajo la mordaza del recorte sujetándolo fuertemente por sus bordes. La segunda acción consiste en bajar el martinete principal con su punzón. El metal fluye alrededor del punzón mientras éste desciende por la cavidad de la matriz. El metal es embutido, o estirado, en la cavidad desde los bordes.

El recorte de lámina, al ser obligado a contraerse circularmente, porque se embute radialmente hacia dentro, tiende a doblarse o arrugarse. Esta tendencia se contrarresta aportando un flujo apropiado del metal, lo cual se consigue inclinando el conjunto matriz y punzón, aplicando alta presión con la mordaza y (a veces) diseñando protuberancias de embutición sobre la superficie de la matriz debajo de la mordaza del recorte laminado. Una matriz puede tener varias de estas protuberancias, cada una con un diámetro comprendido entre media y tres cuartos de pulgada. Ellas controlan el flujo del metal, forzando a la lámina a doblarse y enderezarse mientras va pasando sobre las protuberancias antes de penetrar en la cavidad de la matriz.

A menos que el componente a conformar tenga un diseño muy simple, partes del recorte de la lámina no sólo se embutirán sino que también se embutirán con estirado en cuanto el recorte de la lámina sea prensado dentro de la cavidad de la matriz por el punzón. La embutición con estirado se define como la extensión de la superficie de la lámina en todas las direcciones. Las exigencias del material para embutición difieren considerablemente de las exigencias para embutición con estirado. El progreso en la comprensión de la influencia de las propiedades del material en el flujo del metal se ha conseguido principalmente a través de los ensayos experimentales de laboratorio en los que se embute o se embute con estirado, por separado.

Los fenómenos de la embutición se pueden demostrar describiendo la formación de un vaso cilíndrico de fondo



LOS COMPONENTES ESTAMPADOS vienen así de la prensa de estampación. El componente es un "cuarto de panel" de la parte trasera izquierda de un automóvil; la zona arqueada del centro, que estaría sobre el eje, se recorta en una operación de ajuste, junto con buena parte de los rebordes y del extremo derecho, donde estarán las luces de cola. El material de las esquinas era para sostener el recorte de lámina en la prensa donde se estampaba. El arrugado y plegado proceden de la embutición metálica durante la operación de estampación. Apenas visible en la esquina superior encima de la zona del eje hay un rectángulo oscuro; está hecho de un enrejado de circunferencias que se grabaron sobre el recorte para estudiar la deformación en la estampación. El método de las circunferencias grabadas se detalla en la página 96.

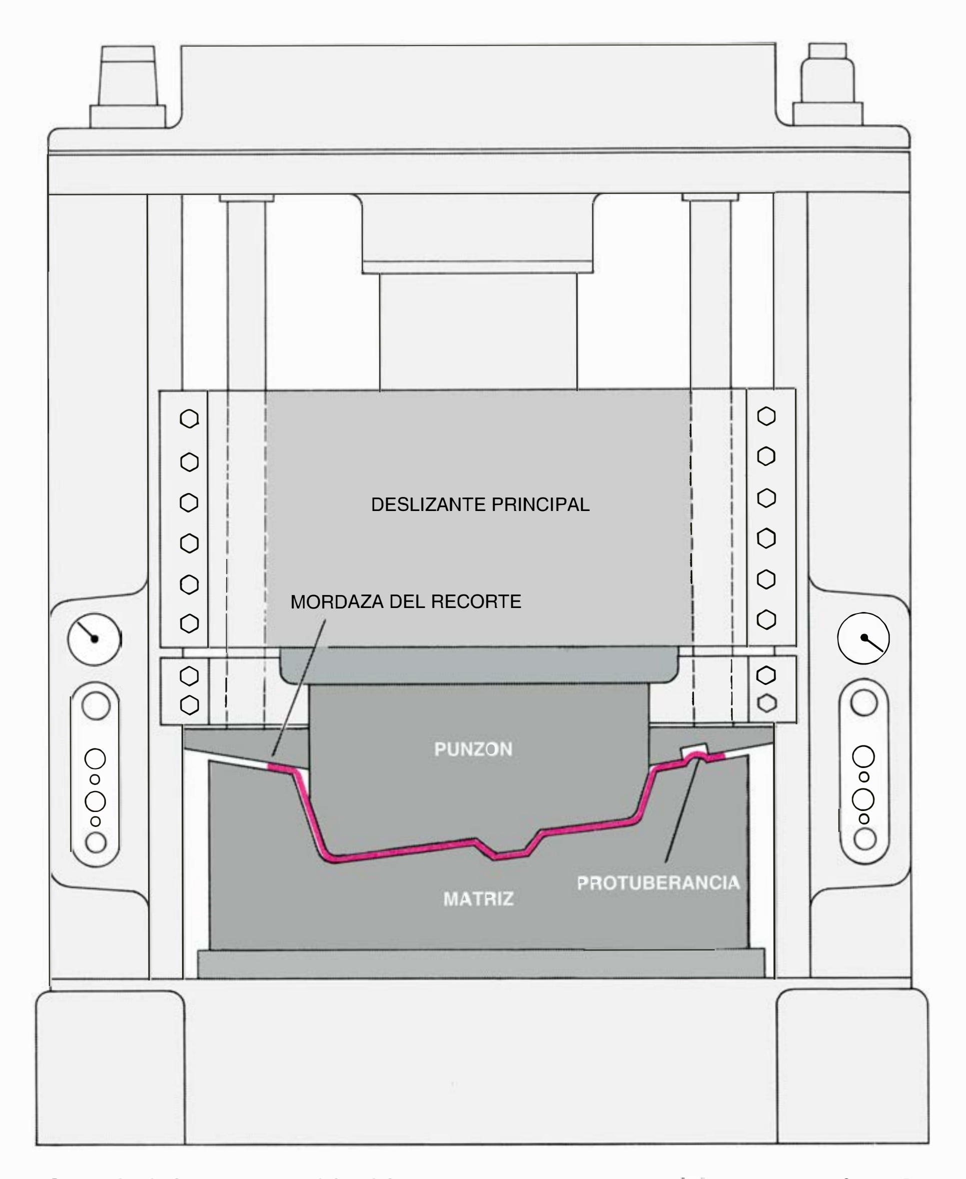
plano *(véase la ilustración inferior de esta página).* El proceso suele denominarse embutición profunda. La mayor parte de la deformación en la embutición profunda ocurre en los laterales; muy poca tiene lugar en la parte del recorte que se halla en contacto con el punzón. El proceso ocasiona un pequeño cambio en el espesor final o en el área superficial.

La contracción circular en los laterales puede causar arrugas si no se aplica la presión suficiente. El peso preciso para deformar los laterales se transmite desde el fondo del vaso a los laterales a través de las paredes del vaso. Si esta carga sobrepasa la que la pared puede soportar, el metal se rompe cerca del fondo del vaso.

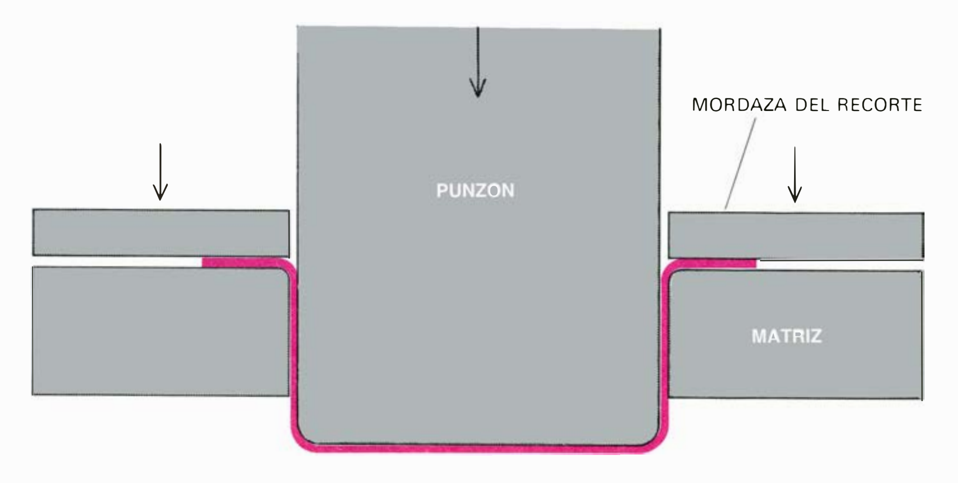
Por consiguiente, para una buena embutición, se necesita un material que resista la reducción de espesor en las paredes del vaso. En otros términos, el material debe tener menor resistencia (así se deformará más fácilmente) en la sección longitudinal de la lámina que en la sección transversal. Esta diferencia direccional en la resistencia se denomina plasticidad anisotrópica. La propiedad se mide fácilmente en una prueba simple de laboratorio. A lo largo de la banda, se corta una delgada probeta y se embute con estirado. La anisotropía plástica se determina comparando la contracción de la lámina en la anchura y en el espesor. Si se contrae más a lo largo de la anchura que a lo largo del espesor, el metal resistirá la reducción en el proceso de embutición y, por lo tanto, producirá vasos más profundos.

La anisotropía plástica se desarrolla durante el hechurado primario, tal como ocurre en la laminación, y refleja la naturaleza cristalina de los metales. Un metal consta de innumerables granos pequeños o cristales, enlazados y libremente orientados. En cada grano cristalino, los átomos se disponen en una red tridimensional muy regular. La cristalinidad es el resultado del enlace atómico peculiar de los metales, que favorece las estructuras simétricas y muy compactas.

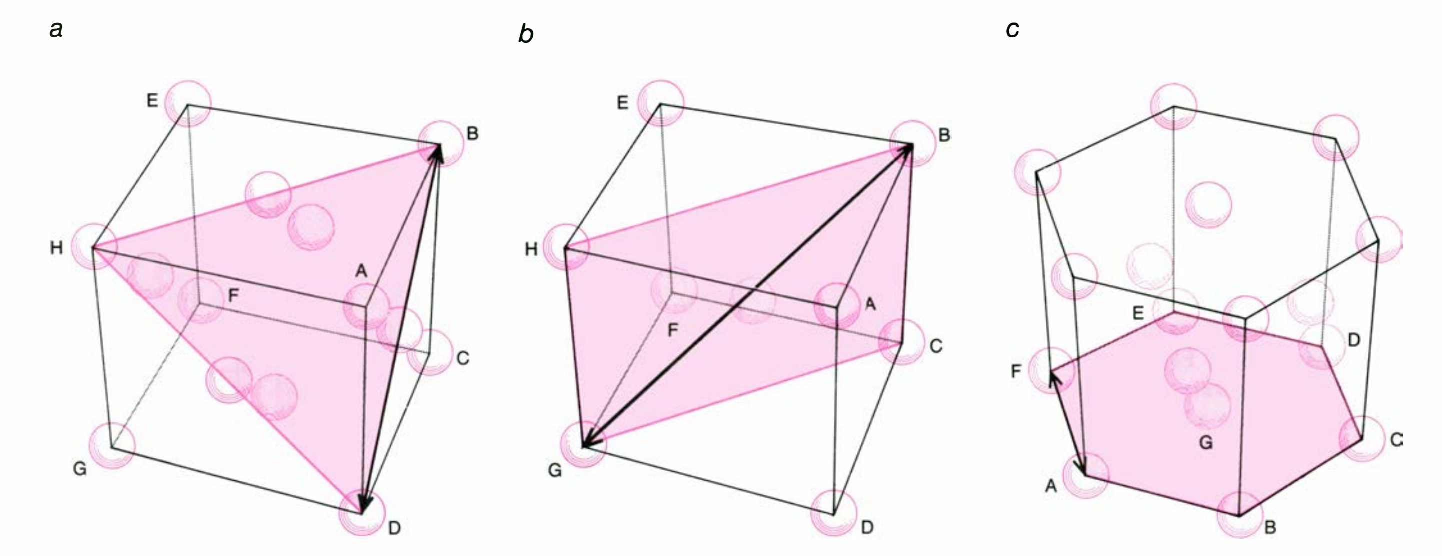
Las estructuras cristalinas muy compactas resisten fuertemente a las fuerzas que tienden a cambiar su volumen, pero fácilmente cizallan y cambian su forma cuando las capas atómicas deslizan una respecto de la otra. Las capas se deslizan más fácilmente a lo largo de direcciones compactas en los planos cristalográficos de máximo empaquetamiento. Las estructuras cristalográficas simples tienen un alto grado de simetría y, por lo tanto, planos y direcciones de máximo empaquetamiento, lo que facilita la deformación plástica.



ESTAMPACION DE UN COMPONENTE en una prensa mecánica de doble efecto. La acción de doble efecto implica el movimiento de dos émbolos: el deslizante principal, que lleva el punzón, o matriz superior, y el émbolo que constituye el alojamiento del recorte de lámina. La primera acción de la prensa consiste en colocar el recorte en el alojamiento y amordazar sus extremos. La acción siguiente estriba en bajar el deslizante principal de modo que el componente *(color)* se hechure entre el punzón y la matriz inferior. Las protuberancias laterales regulan el flujo, doblando y desdoblando el metal hacia el hueco de la matriz.



LA EMBUTICION, uno de los dos procedimientos principales del hechurado de metales por estampación, se ilustra a través de la embutición profunda de un vaso cilíndrico. El recorte circular se embute en la matriz modelada en forma de copa con el punzón de cabeza plana. La pared del vaso soporta la mayor parte de la carga reduciendo el espesor.



ESTRUCTURAS CRISTALINAS más comunes de los metales. Son la cúbica centrada en las caras *(a)*, con un átomo en cada vértice del cubo y otro en el centro de cada cara; la cúbica centrada en el cuerpo *(b)*, con un átomo en cada vértice y otro en el centro del cubo y la hexagonal compacta *(c)*. La estructura afecta a la capacidad que tiene un cristal de cambiar la forma por el mecanismo de deslizamiento o de cambiar la posición de los átomos; por tanto, es una consideración importante en la elección de un metal para hechurarlo. El deslizamiento es más fácil a lo largo de los planos de mayor empaquetamiento *(en color)* en las direcciones de mayor empaquetamiento *(flecha)*.

ESFUERZO CIZALLANTE

PLANO DE DESLIZAMIENTO

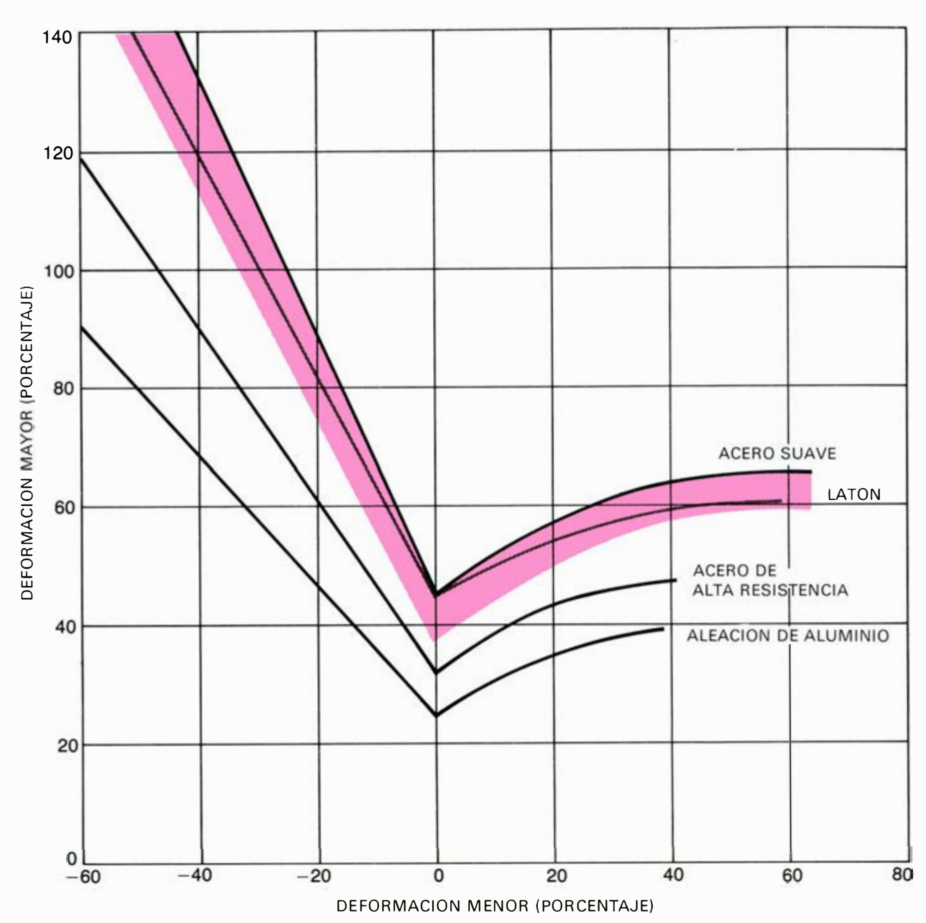
ESFUERZO CIZALLANTE

PAPEL DE LAS DISLOCACIONES en el mecanismo de deslizamiento. La dislocación es un semiplano extra de átomos *(color oscuro)* en la red cristalina. La deformación ocurre por cizallamiento a lo largo de un plano de deslizamiento que es perpendicular al semiplano extra de átomos. Si el esfuerzo cizallante se aplica como indican las flechas *(en la parte superior y en la inferior del grabado)*, los átomos se desplazan en un movimiento parecido al desplazamiento de una arruga en una alfombrilla, dando un cambio de forma al cristal como muestra el color.

El deslizamiento se facilita aún más con las imperfecciones cristalinas llamadas dislocaciones. Son pequeñas irregularidades en la ordenación atómica de los granos y facilitan el deslizamiento parcial de los átomos, en vez de hacerlo por hileras enteras. El movimiento de dislocaciones es el único mecanismo para el deslizamiento. Estas dislocaciones se introducen fácilmente en la estructura cristalina de muchos metales; se mueven libremente y se multiplican rápidamente durante la deformación produciendo así la alta ductilidad de estos metales.

La alineación de los distintos granos metálicos según ciertas direcciones preferentes ocurre durante las enormes reducciones (del orden del 1000 por uno) que supone la laminación de bandas para carrocerías de automóviles a partir de lingotes de acero. Las propiedades de los cristales varían con la dirección debido a la regularidad direccional con que sus átomos están dispuestos; la mayoría de las propiedades de la lámina tienen una direccionalidad similar. Para mejorar la resistencia a la reducción de espesor, y por lo tanto a la mejor propiedad para la embutición, se alinean la mayor cantidad posible de cristales de modo que la dirección que ofrezca mayor resistencia sea paralela a la dirección del espesor del material.

En los cristales con simetría cúbica, que es corriente en los metales, esta dirección pasa a lo largo de la diagonal del cubo. En metales como el acero, que tienen una red cristalina cúbica centrada en el cuerpo (un átomo en cada vértice del cubo y otro en su centro), el alineamiento preferente se puede conseguir con gran facilidad. En metales como el cobre, el latón y el aluminio, que tienen una estructura cúbica centrada en la cara (un átomo en cada vértice y otro en el centro de cada cara del cubo), la alineación es difícil de conseguir debido a la multiplicidad de direcciones en que los cristales pueden deslizarse durante la deformación. En los metales con otras estructuras cristalinas, la dirección de deslizamiento está altamente limitada y, por lo tanto, existe la oportunidad de obtener direcciones, aunque no se alcance necesariamente una alineación favorable. Por ejemplo, el titanio y el cinc tienen una estructura cristalina hexagonal compacta, pero en el titanio la alineación es favorable para la embutición profunda mientras que en el cinc no. Quince años atrás no se había reconocido todavía la importancia de la anisotropía plástica en la embutición profunda. Antes, esta característica se consideraba indeseable: un metal que no se deformara en la misma extensión en todas las direcciones se creía que era difícilmente hechurable. Los aceristas han progresado desarrollando aceros para la embutición profunda, los productores de titanio también han avanzado en la anisotropía preferente. No obstante, los metales cúbicos centrados en las caras todavía se hechuran con dificultad en las operaciones de embutición.



EL DIAGRAMA DE CONFORMACION LIMITE, obtenido por ensayos de deformación metálica, indica si un metal se puede hechurar sin riesgo de rotura o agrietamiento. La ancha banda coloreada representa el acero; con deformaciones por debajo de esta banda cabe esperar un hechurado perfecto, mientras que las deformaciones superiores a la banda causarán defectos durante el hechurado. Las curvas para otros metales son menos fiables que las del acero.

Durante la embutición con estirado, en oposición a la embutición, todos los esfuerzos son tracciones. No hay compresión. La propiedad más importante para un metal que se desea embutir con estirado es su capacidad de endurecimiento mientras se deforma. Este proceso de endurecimiento intrínseco, que se conoce como endurecimiento por deformación, dificulta progresivamente el doblado de un alambre cuando se dobla repetidamente (hasta que, desde luego, el alambre se rompe). El endurecimiento por deformación ayuda a prevenir las deformaciones localizadas desviando las deformaciones a las zonas menos deformadas. Por lo tanto, el proceso facilita una deformación uniforme.

En los metales, el endurecimiento por deformación se demuestra mejor en un ensayo de tracción. La probeta metálica se estira en una dirección hasta que se rompe, y se mide y registra la extensión resultante. La carga requerida para extender el metal continúa incrementándose incluso hasta sobrepasar el límite elástico. Cuanto más aumenta la carga en extensión más incrementa el endurecimiento por deformación.

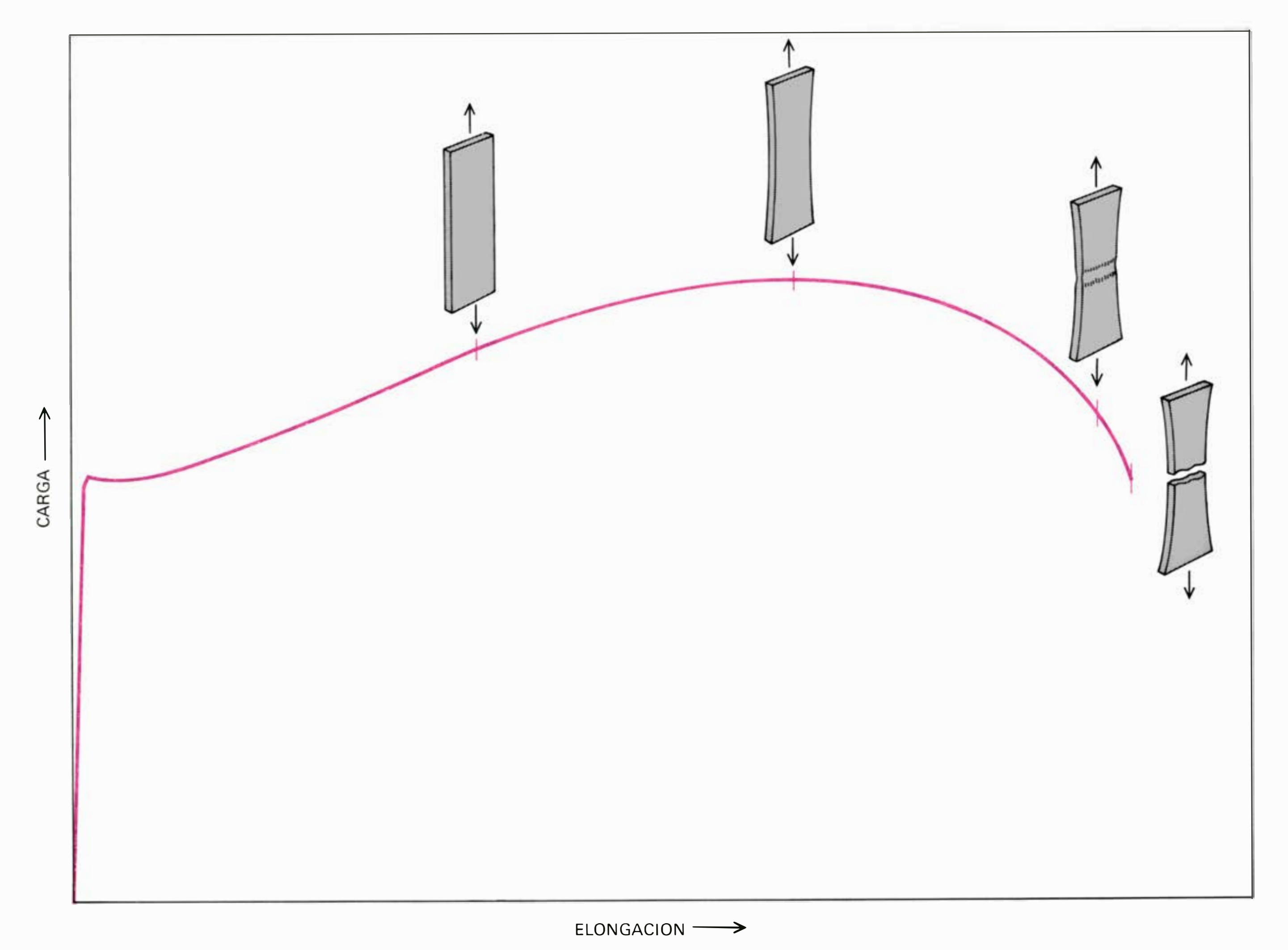
Con el estirado, el metal va reduciendo constantemente el espesor, y así pierde su capacidad de soportar una carga. Esta regularidad geométrica se opone al endurecimiento por deformación y puede dominarlo. En el punto donde las dos están en equilibrio, la carga alcanza el valor máximo. La deformación posterior se convierte en inestable porque continúa deformándose incluso con carga menor. Gradualmente se concentra en torno a un punto débil en el material, proceso denominado estricción difundida. Finalmente, la deformación se concentra totalmente en la estricción ("espesor estrangulado") y el material se rompe.

Cuando comienza la estricción difundida, también se genera un gradiente en

la velocidad de deformación a lo largo de la probeta. La resistencia de muchos metales es sensible a la velocidad de deformación. Durante la estricción, un metal que endurece cuando aumenta la velocidad (endurecimiento por velocidad de deformación), resistirá la deformación localizada y retardará la fijación de la reducción local de espesor. La temperatura de deformación influye en el endurecimiento por deformación y en el endurecimiento por velocidad de deformación. Cuando una lámina metálica se hechura mediante matrices, los gradientes en la deformación y en la velocidad de deformación aparecen rápidamente debido a la compleja geometría de la forma y la fricción resultante del contacto entre el metal y el punzón. El endurecimiento por deformación y el endurecimiento por velocidad de deformación resultan, consiguientemente, vitales para alcanzar una deformación uniforme.

El endurecimiento por deformación y el endurecimiento por velocidad de deformación pueden explicarse en términos del comportamiento de los átomos durante la deformación del metal. Un cambio en la forma requiere el deslizamiento dentro de los cristales metálicos. El deslizamiento procede del movimiento de dislocaciones. El endurecimiento depende de cuánta resistencia encuentran las dislocaciones en su deslizamiento a lo largo del cristal. La resistencia es debida a obstáculos tales como límites de cristal, átomos extraños y defectos de disposición de los átomos en el cristal. La cantidad de resistencia depende del tipo de estructura cristalina. En el latón, el bronce y algunos aceros inoxidables, por ejemplo, los defectos de disposición son de distancias equivalentes a varios diámetros atómicos; los defectos, por tanto, pueden ser obstáculos muy fuertes, de manera que el metal resista el deslizamiento cruzado. En consecuencia, las dislocaciones comienzan a apilarse en distribuciones bidimensionales, muy parecidas a las de los automóviles en un semáforo; un continuo apilamiento conduce a un endurecimiento rápido. En el otro extremo del modo de endurecimiento, el aluminio y el hierro presentan un fácil deslizamiento cruzado y se endurecen más lentamente.

Los obstáculos pueden originar trastornos locales o de mayor amplitud en un cristal. Si el trastorno es de este segundo tipo (quizá mayor que 10 diámetros atómicos), como una gran partícula extraña o dislocaciones apiladas en planos de deslizamientos paralelos en el caso del latón, la velocidad de deformación no influirá en la deformación plástica o en el endurecimiento. Si el trastorno es local, tal una discontinuidad debida a un átomo extraño o a otras dislocaciones individuales, la vibración térmica de los



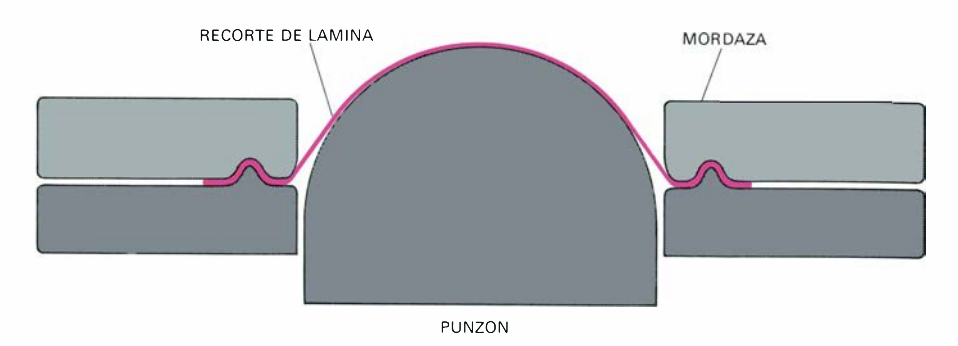
LA ELONGACION BAJO CARGA se ensaya colocando una probeta de lámina metálica hasta la rotura por tracción. El punto donde la línea coloreada recta pasa a curva es el límite elástico; después de ésta, la forma del metal cambia permanentemente. Más allá de este punto, el metal se endurece al estirarse, por tanto es capaz de aguantar un aumento de carga. El endurecimiento intrínseco, denominado endurecimiento por deformación neutraliza la disminución de la capacidad del metal de aguantar cargas debido a la reducción de espesor. En la carga máxima *(pico de la curva)* las dos fuerzas se neutralizan y empieza el proceso de localización de la deformación, resolviéndose probablemente en la rotura del metal. Sobre la referida curva, se representa la forma del metal en las diferentes etapas. En la carga máxima aparece un cuello difuso; muy próximo a la rotura se aprecia un cuello localizado, lugar por donde, precisamente, el metal se fracturará.

átomos en la malla cristalina puede favorecer la deformación plástica. Si la velocidad de deformación es alta, la ayuda es menor, dando un endurecimiento superior que el de velocidades más lentas.

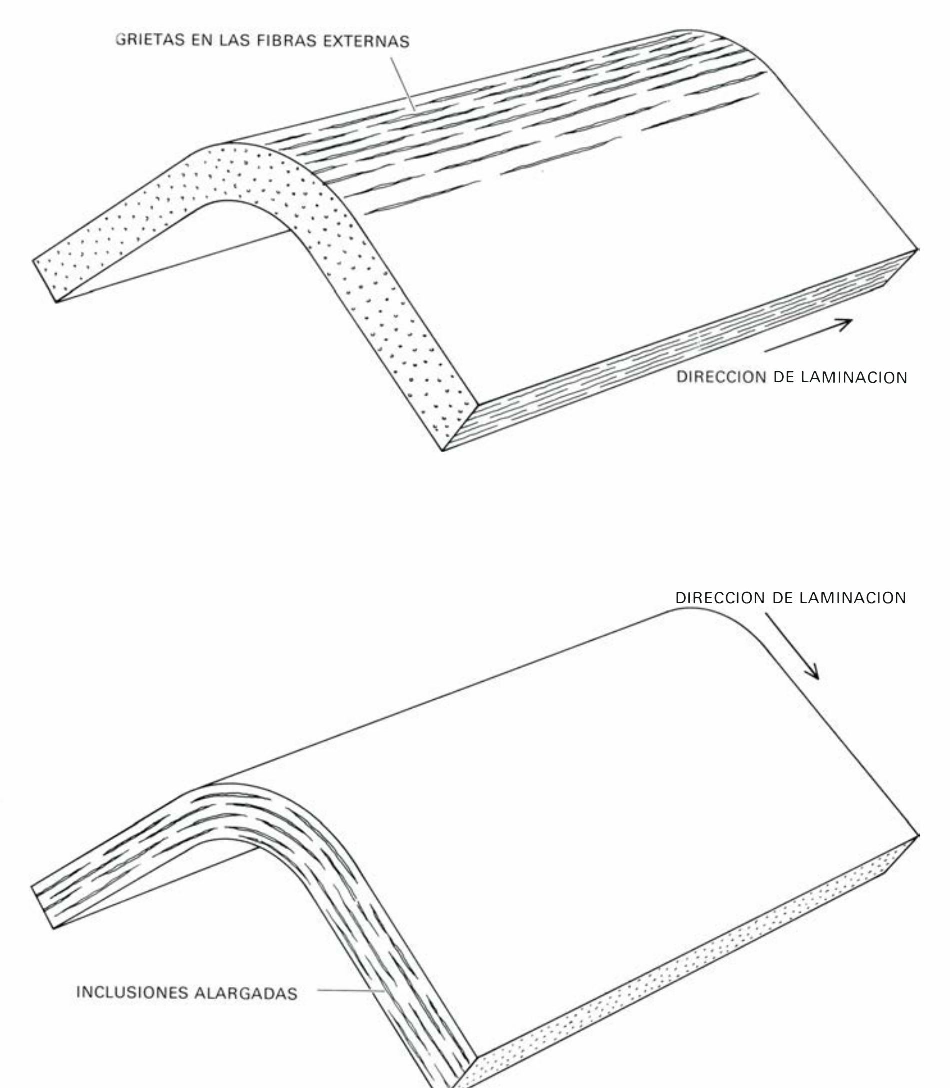
La importancia de estos procesos microscópicos, de endurecimiento por deformación y endurecimiento por velocidad de deformación, en la uniformidad de deformaciones a gran escala se comprende mejor en el laboratorio con un ensayo de embutición. Se marca un recorte de lámina metálica con una plantilla de circunferencias de pequeño diámetro, las cuales se emplean como medios para medir la deformación. Entonces se sujeta firmemente para prevenir la embutición en los bordes y se deforma con un punzón semiesférico de acero sin lubricar. Para una buena embutición con estirado se requiere una deformación uniforme en toda la huella.

Otro factor importante en la embutición con estirado es la deformación total que el material experimenta antes de romperse o agrietarse. Stuard P. Keeler, de la National Steel Corporation y Gorton M. Goodwin, de la Chrysler Corporation, desarrollaron la idea de un diagrama empírico de conformación-límite. Tras muchas pruebas en el laboratorio y examinando cientos de estampados procedentes de la línea de producción, hallaron que sólo había una banda de rotura en el diagrama para aceros suaves. La banda se determina representando la deformación en la superficie mayor de la lámina (la deformación mayor) frente a la deformación perpendicular a ella (la deformación menor). La banda de rotura separa entonces las combinaciones de deformaciones que son aceptables (por debajo de la banda) de las que producen rotura (por encima de la banda). Estas curvas se pueden determinar completamente a partir de las mediciones obtenidas en pruebas de embutición. Para la mayor parte de operaciones de estampación, los diagramas de deformación-límite han dado cabalísimas predicciones de roturas y han sido muy útiles en la predicción de la deformabilidad *(véase la ilustración de la página 93)*.

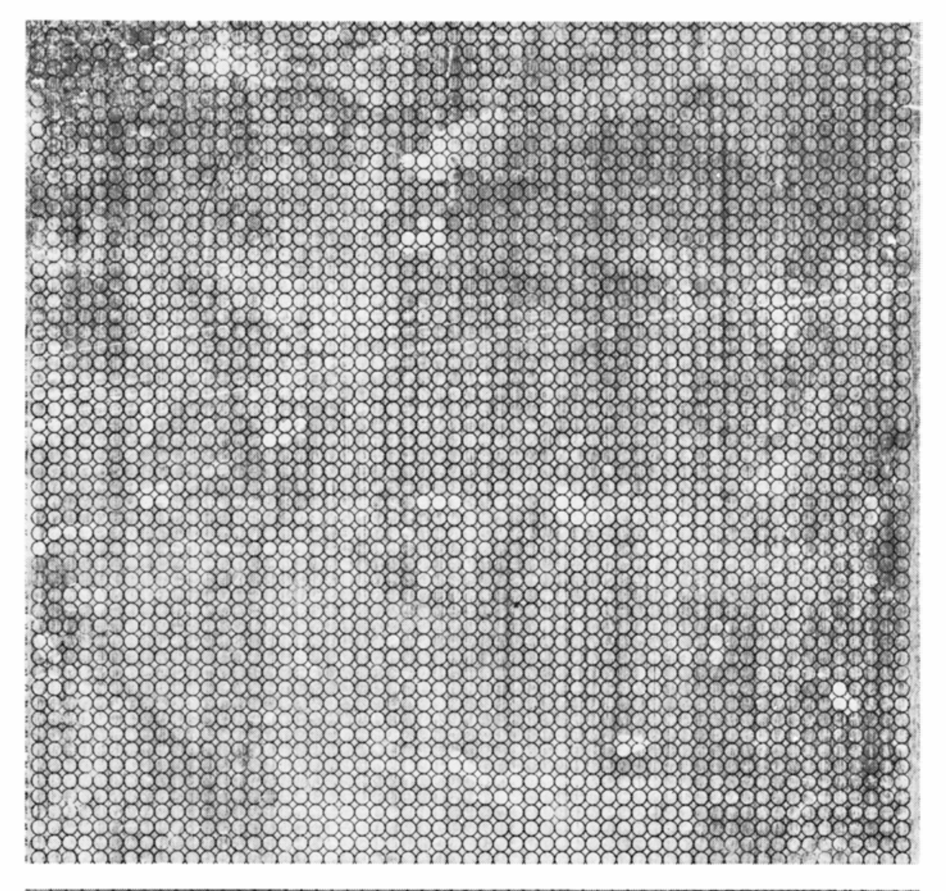
La mejor medida de embutición con estirado viene dada por la mayor altura que adquiere la cúpula antes de la rotura durante el ensayo de embutición. La medida combina la importancia de la uniformidad de deformación y la deformación de rotura; revela la superioridad del latón (elevado endurecimiento por deformación) y el acero (moderadamente alto endurecimiento por deformación y endurecimiento por velocidad de deformación) y el pobre comportamiento de al-

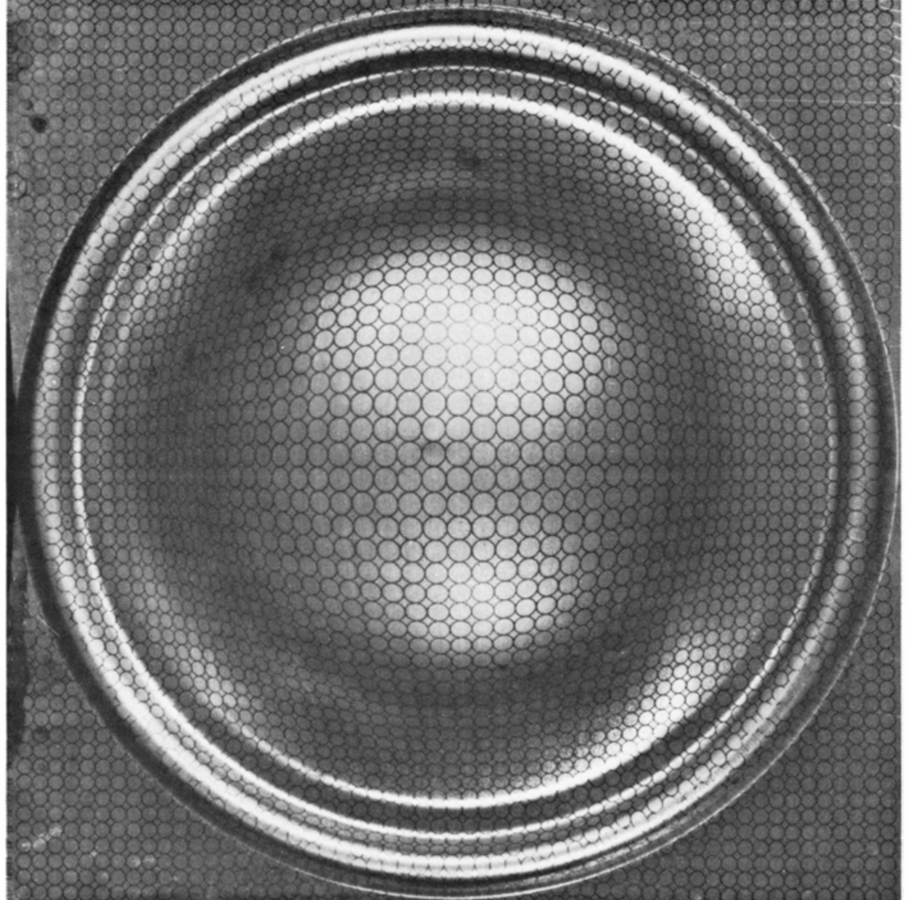


LA EMBUTICION CON ESTIRADO es, en importancia, el segundo modo de hechurado de bandas metálicas por estampación. Es lo que se ilustra aquí a través del ensayo con un punzón deformador que se emplea en el laboratorio para dilucidar la deformación de una lámina metálica durante la embutición con estirado. Se sujeta firmemente un recorte de lámina metálica *(color)* por los bordes, y luego se deforma sobre un punzón hemiesférico. La ranura en la matriz superior y la protuberancia en la matriz inferior aseguran que no ocurra embutición en el metal; por tanto, el ensayo informa sólo de la embutición con estirado.



LA OPERACION DE DOBLADO, suele formar parte del hechurado de bandas metálicas, particularmente haciendo pestañas, de suerte que un componente pueda enlazarse con otro. Durante el doblado, las fibras de la lámina que quedan en la parte exterior del doblado están bajo tracción y, las interiores, bajo compresión. Las impurezas interiores (inclusiones) se alargaron en "cordones" cuando el metal se laminó en forma de banda. Durante el doblado, los cordones pueden originar fallos en la lámina, rompiéndose si están orientados perpendicularmente a la dirección de doblado *(arriba);* pero si están orientados en la dirección dada al doblado *(ilustración inferior)* la ductilidad del metal permanece normal.





METODO DE PLANTILLA DE CIRCUNFERENCIAS usado para comprobar estampaciones. Arriba, una lámina de metal de acero en la que se ha impreso una plantilla de circunferencias de 2,5 milímetros. Abajo, una figura en forma de cúpula procedente de la estampación realizada en el aparato del laboratorio que efectúa un punzón con estirado. Las alteraciones de los círculos tras la estampación muestran la concentración y cantidad de deformaciones.

gunas aleaciones de aluminio (moderado endurecimiento por deformación pero ablandamiento por velocidad de deformación).

Las propiedades del material no constituyen el único factor importante en el hechurado; otro factor importante es la lubricación. Aunque se conoce poco sobre los mecanismos de lubricación en el hechurado de láminas metálicas, los efectos beneficiosos son muy conocidos. La lubricación ayuda siempre a distribuir la deformación más uniformemente; con frecuencia, resulta ser más eficaz que una mejora en las propiedades del material.

Las operaciones del doblado son una parte integrante de todas las estampaciones complejas. En el doblado, en contraste con la mayor parte de las operaciones de embutición con estirado, hay un elevado gradiente de esfuerzos a lo largo del espesor del material. En el exterior del doblado, el esfuerzo es de tracción; en el interior es de compresión o de un nivel reducido de tracción. La gravedad de las deformaciones por tracción depende del radio de curvatura, ángulo y longitud. El fallo aparece en el lado de la tracción por reducción de espesor y rotura. El endurecimiento por deformación, el endurecimiento por velocidad de deformación y la deformación de rotura son factores importantes en la calidad de un metal para doblar.

La diferencia más significativa entre el doblado y la embutición con estirado corresponden al papel que desempeñan las impurezas microscópicas o inclusiones no metálicas. Se introducen durante la solidificación del metal en el molde. Durante la laminación en caliente se alargan en "cordones". En el doblado, los cordones producen roturas prematuras si están orientados perpendicularmente a la dirección del doblado. Si el material se dobla con los cordones orientados paralelamente a la dirección del doblado, se mantiene a ductilidad normal *(véase la ilustración inf. de la pág. 95)*.

Esta diferencia entre la doblabilidad longitudinal y la doblabilidad transversal no siempre se revela en las pruebas de tracción. En los aceros de alta resistencia y baja aleación, recientemente desarrollados, la forma de las inclusiones se controla añadiendo durante el moldeo pequeñas cantidades de tierras raras como el cerio. El cerio se combina con inclusiones de sulfuro de manganeso que están normalmente presentes y las hace fuertes a las temperaturas de laminación del acero. Por lo tanto, las inclusiones no se deforman con la laminación del

lingote. Permanecen esféricas y, por lo tanto, no producen las propiedades de doblado transversal indeseables.

Durante muchos años los aceros suaves han satisfecho casi todas las exigencias para el hechurado de láminas metálicas. Pueden soportar bien la deformación inherente al hechurado; pueden producirse con anisotropía plástica favorable, respetable endurecimiento por velocidad de deformación y una elevada curva de deformación-límite; se producen grandes cantidades a bajo costo; además, poseen una excelente tenacidad y buena resistencia, de modo que cumplen muchas exigencias estructurales y poseen un buen acabado superficial.

Las últimas tendencias en la industria del automóvil han insistido en la reducción del peso del vehículo para rebajar el consumo de combustible, empleando, al propio tiempo, un material dotado de una alta resistencia y capaz de absorber la energía en las colisiones. Resultado de lo cual es la introducción en los automóviles de materiales como aleaciones de aluminio y aceros de alta resistencia, cuya razón de proporcionalidad resistencia/peso es mayor que en los aceros suaves. El hechurado de estos materiales se hace más difícil que el de los aceros suaves convencionales, y se carece de experiencia de producción. La selección de metales para estampación ha sido altamente facilitada por los estudios de laboratorio de los simples procesos de hechurado que hemos descrito. Hoy se sabe que la elección del ensayo de laboratorio adecuado depende de la forma de la estampación y del modo de hechurado. Si se puede identificar el modo crítico de estampado, eso es, si se puede conocer por dónde estará la pieza más estirada o comprimida, la selección del material adecuado resultará más fácil.

El principal problema que se plantea en el estudio analítico del hechurado de láminas es el de la predicción de las figuras de deformación. Puesto que la deformación ocurre de diferentes maneras y en diferentes lugares, los cálculos matemáticos basados en modelos de esfuerzos simples y de propiedades ideales no dan resultados aceptables. Mayor éxito, al menos en lo referente a la predicción de figuras de deformación en estirados simples y simétricos y embutidos con estirado, se han alcanzado con el método de los elementos finitos de análisis de esfuerzos; en éste, la forma se divide en pequeños elementos y las ecuaciones adecuadas para el análisis de los esfuerzos se resuelven para cada uno de ellos. Tal enfoque es posible solamente con un moderno computador de alta velocidad. Aun así, las soluciones suelen estar lejos de nuestro alcance para formas complejas en régimen de cargas.

En este contexto, el método de la plantilla de circunferencias, mencionado en relación con la embutición con estirado, ha demostrado ser de utilidad en las estampaciones procedentes de línea de producción. El método fue introducido por Keller como sustituto del de cuadrados de 25,4 mm que se usaba antes. Un rápido procedimiento electroquímico coloca una rejilla de circunferencias (2,5 o 5 mm de diámetro) sobre recortes de láminas de metal. Después que la lámina se ha estampado, los círculos revelan la figura de deformación. Las áreas de deformación grave se marcan por inspección. Un conjunto de círculos en un área crítica puede medirse y representarse para indicar cuán gravemente está concentrada la deformación. Los cambios en variables del proceso de estampación, tal como la lubricación, la presión de la matriz y las protuberancias de embutición y el tamaño y forma del recorte de la lámina pueden representarse para ver si realmente aumentan la uniformidad de la deformación. En casos muy problemáticos, se pueden medir las deformaciones en varias etapas de la estampación para determinar la historia de la deformación. Conociendo esta historia, se puede esperar evitar la concentración de deformaciones, tan cuestionable.

El análisis de las circunferencias sirve también, junto con la idea de deformación límite, para conocer hasta qué punto una estampación puede deformarse sin roturas. Resulta asimismo de interés en el estado de preproducción, cuando se hacen los últimos cambios en las matrices y en la selección del material. El método ayuda a determinar si la matriz, la lubricación y el material producirán una estampación satisfactoria.

En ocasiones pueden surgir dificultades tras largos períodos de producción. La estampación de algunos patrones previos indicará si los problemas proceden del comportamiento de la matriz, de una lubricación deficiente o de cambios en el material. El arte de resolver problemas se ha depurado mucho, toda vez que cualquier cambio operado en la línea de montaje puede visualizarse estampando recortes de las láminas con circunferencias. El análisis de la plantilla con círculos ha substituido a la intuición del artesano en lo referente a la elevada plasticidad del metal; asimismo, el concepto de hechurado-límite ha proporcionado una herramienta de diagnóstico para el análisis de rotura.

Juegos matemáticos

En donde DM (Dr. Matrix) se revela como el gurú de la MP (Meditación Pentagonal)

Martin Gardner

"La magia te induce a interrogar al mundo; aumenta tu nivel de conciencia. Voy a montar un espectáculo tan fantástico que la gente habrá de poner en duda su realidad." Así se expresa el mago Doug Henning en el *New York Times* del 19 de julio último. La nueva popularidad alcanzada por la magia en Norteamérica no es más que una manifestación de la revolución esotérica y constituye la respuesta, una respuesta, al ansia creciente del público por milagros y misterios. Al tiempo que continúa su onda expansiva, ese ritualismo que alimenta tales afanes, importado en su mayor parte de Oriente, ha prendido un fuerte movimiento de concienciación, cual fuego en un bosque, por toda la región de Bengala, en la India.

El movimiento en cuestión se denomina MP, que son las siglas de Meditación Pentagonal. Quizás se deba su escasa resonancia en Occidente a que se inició hace apenas un año, en un obscuro templo consagrado a Shiva, en las afueras de Calcuta, ciudad hindú alejada de las rutas turísticas, cual si estuviera apestada.

A quien primero oí hablar de la MP fue a mi amigo Sam Dalal, un mago de Calcuta (*Sam the Sham,* Sam el impostor) que edita una divertida publicación sobre magia, llamada *Mantra,* a la que estoy suscrito y en la que he llegado a publicar algo (su dirección postal es *Mantra,* Box 6640, Esplanade P. O., Calcutta 700 069, por si le interesa a alguien). En un recuadro del periódico de Sam podía observarse una fotografía del fundador de la MP, Guru Marahashish, de pie ante el santuario, con Zuleika. Costaba distinguir las facciones de Marahashish, pues su larga barba blanca, su bigote y su cabello lacio le tapaban la cara, pero la sonrisa de Zuleika se apreciaba perfectamente. Aunque tenía la piel obscura y estaba marcada con la señal de los pertenecientes a la casta de Shiva (tres rayas horizontales), que decoraban su frente, no había lugar a equivocaciones con aquellos encantadores ojos japoneses. ¡Era Iva, la hija euroasiática del Doctor Matrix!

¡Qué casualidad! pensé. Si quitas las dos primeras letras de "Shiva", te quedas con Iva, su nombre. Telefoneé a Sam para decirle que iría a Calcuta el lunes siguiente.

Habían transcurrido diez años desde que visité por última vez a Sam; con el crujir y el crepitar del autobús, en su camino desde el aeropuerto de Dum Dum hasta el Grand Hotel, el viejo y familiar olor de Calcuta penetró por las ventanas abiertas. Eran las cuatro de la madrugada; hacía calor, había niebla y no se movía una hoja. A excepción de unos cuantos edificios de nueva planta, altos, la ciudad aparecía como siempre. Las aceras estaban repletas de los cuerpos de gente mísera, embutidos en sucias ropas de algodón, como cadáveres en sudario; muchos serían cadáveres al amanecer. Unas vacas buscaban entre los desperdicios de las basuras. Algún madrugador se lavaba en una boca de incendios, y otro defecaba en un callejón.

¿Existe otra ciudad en el mundo en la que el visitante se enfrente tan directamente con el hambre, el sufrimiento y la muerte? En Calcuta sólo hay una manera de no volverse loco, y es contemplar la ciudad como si se tratara de un decorado de Hollywood, como si nada fuera real, como si se tratara de una película de terror en relieve en la que nos vemos fascinantemente sorprendidos.

Encontré luego a Sam, por la mañana, en su destartalado despacho, en un segundo piso de una construcción relativamente baja en el corazón de la ciudad. Apenas si había cambiado; aparecía joven, enérgico, de facciones agradables, con su espeso bigote negro, barba de chivo y ojos negros azabache. Sam es un parsi zoroastrino de Bombay. Como en cualquier sesión de ilusionismo, no perdimos el tiempo en frivolidades y nos sentamos inmediatamente para enseñarnos mutuamente los últimos trucos de la baraja.

Sam quería ver al Dr. Matrix; sabía que este gran numerólogo había sido en su juventud ayudante de Tenkai, un afamado ilusionista japonés que se había especializado en juegos de manos. Después del almuerzo subimos al fiat negro de Sam en dirección al templo, que distaba a una hora aproximada de viaje. Conducía atentamente por las bajas rikishas. Entramos en Maidan, el magnífico parterre del centro de Calcuta, que empieza en el norte en la Red Road y continúa al oeste a través del Howrath Bridge. Cientos de hindúes se bañaban, allá abajo, en el río Hooghly, uno de los numerosos canales del Ganges. Miles de hindúes mueren a diario por beber del agua sagrada, pero ¿qué importa? Existe la creencia entre la clase médica de Calcuta, particularmente entre los homeópatas, de que quienes logran sobrevivir ganan en defensas contra las enfermedades indígenas.

Una vez en el templo, recientemente restaurado, un joven hindú, descalzo, de limpios calzones cortos, nos salió al paso; Sam me presentó como periodista americano que quería escribir sobre la MP. ¿Podría recibirlo el Guru Marahashish?

"Nos sentimos muy honrados con la visita del sahib", replicó el muchacho con una leve inclinación.

Avanzó raudo hacia el gran *nataraja,* que es la tradicional estatua en bronce de Shiva danzante, y apretó un botón que estaba en medio de la frente del dios. Se oyó el carillón del templo. Al poco, Iva en persona abrió la puerta luciendo un sari de lentejuelas pentagonales.

"¡Vaca sagrada"! exclamó.

Nos dimos un abrazo (Iva olía mucho mejor que Calcuta), y una vez que le hube presentado a Sam, nos condujo hacia su padre. El suelo del templo estaba recubierto con baldosas nuevas, de un curioso dibujo, diseñado por Harry Turner, un artista de Cheshire, Inglaterra *(véase la ilustración de la página siguiente).* El dibujo parecía representar una estructura tridimendional; pero si se prestaba mayor atención, podía observarse que los bloques formaban una disposición imposible; tal estructura no podía darse. Grandes espejos revestían las paredes y el techo. Sam se repetía y multiplicaba en todas las direcciones; Iva y yo parecíamos extendernos hasta lo infinito.

Al entrar en un corredor, Iva nos detuvo ante una estatua de madera de Kali, la de cuatro brazos, la forma "mala" de la consorte de Shiva, la diosa madre de Calcuta. Cuenta la leyenda que Vishnú amputó una vez a Kali; uno de sus dedos cayó en una zona que se convertiría en Kali-cutta: el campo de Kali. La piel de la imagen estaba pintada en negro. De su boca sonriente pendía una lengua color escarlata. De cada lóbulo colgaba un hombre ahorcado, y su cuello de ébano lucía un collar de calaveras humanas.

¿Quién es ésa que está postrada, y sobre la que bailan? pregunté.

"Su marido" ¿Quién más puede ser?" Me sorprende que su revista no la haya reproducido en portada. Es muy popular aquí".

"Te envié mi nuevo libro de Scribner, *The Incredibile Dr. Matrix*. ¿No la recibiste?"

Iva asintió al par que abría la puerta del despacho. "Lo perdí. Lo dejé descuidadamente y nunca más volví a encontrarlo. Ahora debéis excusarme. Os veré más tarde."

La figura esbelta del Dr. Matrix se nos apareció detrás de su mesa de trabajo. Tenía teñidas de un blanco de nieve su barba y su cabellera; su piel, de oscuro. No existía cirugía plástica alguna capaz de recortar su enorme nariz falconiforme. Unas cejas, obscuras también, separaban sus ojos color esmeralda de las rayas frontales de Shiva.

"Bienvenidos a Calcuta", nos saludó, con un cortante acento británico. "Tomad asiento. Os hablaré de la MP."

En el Himalaya, como discípulo de Swami Fondahondashankarbabasaranwrapi, el Dr. Matrix había aprendido los cinco principios fundamentales de la MP. El swani, que presidía su despacho en un retrato al óleo, llamó a su doctrina Meditación Fundamental, nombre que cambió el Dr. Matrix porque podía dar lugar a malentendidos en su abreviatura inglesa

"El primer principio de la MP", dijo el Dr. Matrix, "es: lo que es no es. A ello lo denominamos el no-ser. El universo, en el que nos incluimos tú y yo, es un monstruoso escenario mágico bajo el conjuro de Brahma, mientras su colega Shiva danza entre bastidores. Todo ello queda perfectamente simbolizado en el *nataraja (véase la ilustración de la página siguiente).* El universo acaba de empezar uno de sus ciclos infinitos; el anillo de fuego es la bola de fuego de la gran explosión. El tambor, sobre la mano derecha de Shiva, toca los ritmos del no-ser del espacio-tiempo; la llama en su mano superior izquierda es la energía que alimenta al mundo y finalmente lo devora; su mano inferior derecha está levantada con un gesto que significa: no tengáis miedo; su mano inferior izquierda señala hacia uno de sus pies, que está levantado, y significa la liberación del cautiverio de *maya:* el poderoso y mágico encantamiento que induce a los no iniciados a creer que el mundo es real."

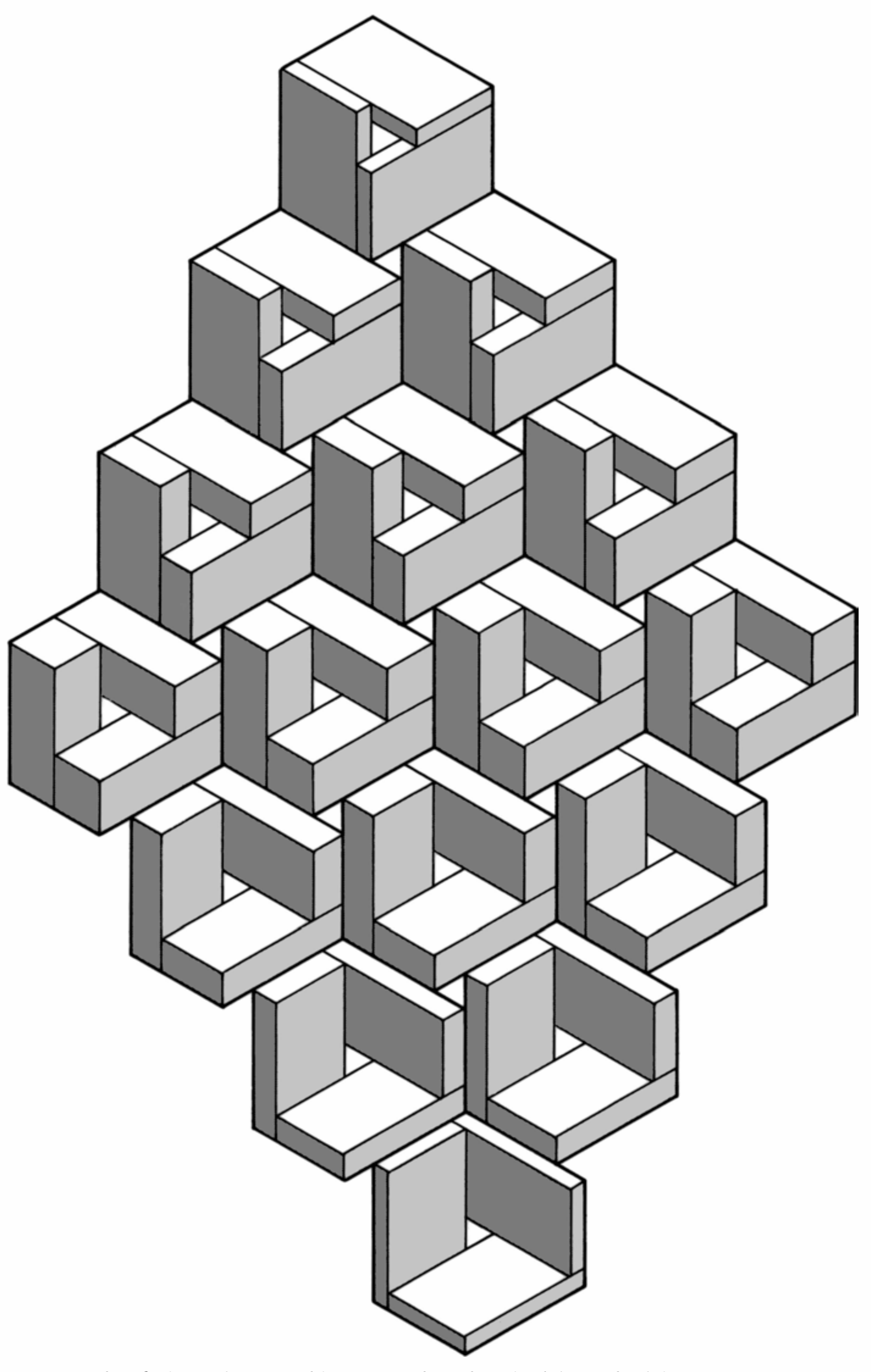
El Dr. Matrix agarró un pequeño *nataraja* marfileño de encima de su mesa. "¿Quién es el enano que está bajo el pie de Shiva?", pregunté.

"Es el demonio de *avidya* o de la ignorancia".

"He oído hablar de *avidya*", dijo Sam. "Solamente Brahman-Atman es real. El mundo existe en el mismo nivel de irrealidad que tienen los sueños. Todos nosotros somos fantasmas en la mente de Brahma, destinados, como los mismos dioses, a ser absorbidos de nuevo dentro de "El". Bajo el encantamiento de *maya* vemos el mundo roto en muchas partes, pero las partes son solamente ilusiones producidas por el Gran Mago".

El Dr. Matrix asintió con la cabeza mientras acariciaba su barba. Dio unas palmadas; una joven hindú entró en el despacho llevando una copa de cristal llena de un pálido vino negro. El Dr. Matrix lo colocó en el centro de una pequeña mesa redonda; constaba ésta de un tablón en forma de disco, de aproximadamente un centímetro de grosor, y de un pie central, de aproximadamente un centímetro de diámetro y dos metros de altura. Cubrió la copa con un cilindro azul, alto, abierto por ambos extremos.

"Volveremos a ello en seguida", dijo el Dr. Matrix. "El segundo principio de la MP es lo que nosotros llamamos la "ironía del no-ser, que se materializa de la manera siguiente". Sin pestañear emitió un fuerte y agudo sonido.



El embaldosado imposible que recubre el suelo del templo del Dr. Matrix

"¿Qué diablos significa esto?", preguntó Sam.

"Esto", respondió el Dr. Matrix, "es nuestra técnica para reaccionar frente a algo que amenaza despertar nuestras emociones. Puesto que nada existe, no hay nada fuera, que nos perturbe. Si nos cruzamos con un mendigo, mutilado, ciego o hambriento, reiremos de esta manera. Si nos cruzamos con un cadáver nos reímos de este modo también. Si tenemos dolor de cabeza o cualquier otro tipo de dolor la ironía del no-ser lo hace desaparecer. Nada existe; por eso el mundo es perfecto. Es lo que no es, ¿por qué intentar cambiarlo? Tan pronto como un estudiante de la MP se apodera de esta gran verdad decimos que él o ella 'lo ha perdido'. Sólo perdiendo todas las ilusiones se puede encontrar la verdadera paz interior y avanzar en el juego del tenis.

"¿Y su tercer principio?".

"Es la santidad del cinco, número de letras que contiene la palabra Shiva. Cinco es el dígito que está en medio en la serie del 1 al 9. Es el dígito central del *Lo Shu,* el viejo cuadrado mágico chino de orden tres".

"Recuendo", dije, "que, en 1966, antes que el número pi se calculara en Francia con un millón de cifras, usted predicaba que el dígito número un millón, contando el primer tres como un dígito sería el cinco".

"Y estaba en lo cierto, ¿no es verdad? El cinco es un número importante. Has de saber que, en el siglo XVII, Sir Thomas Browne escribió todo un libro sobre la omnipresencia del 5". (No lo sabía pero más tarde lo comprobé. El título completo del libro es *The Garden of Cyrus or The Quincuncial Losenge or Network Plantations of the Ancients, Artificially, Naturally, Mystically Considered.*)

"Veamos", dije meditabundo, "hay cinco bloques platónicos".

"Sí", dijo el Dr. Matrix, acariciando su barba con la mano. "Y cinco puntos determinan una cónica. Es de quinto grado la ecuación de menor orden que no puede ser resuelta por radicales. El número de divisiones necesarias para encontrar el máximo común divisor de dos números nunca es superior a cinco veces el número de dígitos con que se escribe el número más pequeño. Todos los grupos de orden cinco o menos son conmutativos. Hay otros muchos ejemplos".

"No olvides", dijo Sam, "que tenemos cinco dedos en la mano y cinco en el pie. Una estrella de mar suele tener cinco puntas y la mayoría de las flores tienen cinco pétalos".

"¿Cómo entra el cinco en el aprendizaje de la MP?", pregunté.

"Sobre ello están meditando nuestros neófitos. Cinco veces al día en períodos de cinco minutos, se colocan en la posición del loto, cierran sus ojos, respiran por el orificio izquierdo de la nariz y repiten la palabra cinco interiormente mientras dibujan su número en sus mentes. Al final de cada período cantan un *mantra* secreto que les damos tan pronto como han traído a sus maestros tres regalos de ritual."

"¿Qué tipo de regalos?".

"Uno es un espejo de bolsillo. La imagen del espejo representa el carácter de ilusión que tiene el mundo que refleja. Otro es un plátano, que simboliza al *shivalinga,* el símbolo fálico de Shiva venerado en toda la India; el placer sexual es una de las mayores ilusiones de Brahma. El tercer regalo es el equivalente a un billete de 50 dólares; es el primero de cinco pagos de 50 dólares cada uno. Los maestros deben donar una quinta parte de cada pago a nuestro templo".

"¿Sólo una quinta parte?", preguntó Sam.

"Sí. Zuleika ríe con ironía durante el camino hacia el banco. Nuestro cuarto principio es la doctrina del eterno retorno; enseñamos que cada uno tiene un cuerpo no material (los cristianos lo llaman alma) que sufre cinco encarnaciones, cada una en un ciclo diferente del cosmos. Después de que cada universo es transportado al no-ser por Shiva, se dilata durante 50 mil millones de años, se contrae luego durante otros cincuenta mil millones de años y, por último, entra en un agujero negro".

"¿El agujero negro de Calcuta?".

El Dr. Matrix ignoró mi comentario, pero Sam se estremeció. "Después de cinco ciclos, los universos se repiten. La sexta encarnación vuelve a colocar el cuerpo no material en el primer universo, en el mismo cuerpo físico que había tenido antes. Simbolizamos esto con una curiosa secuencia numérica que aprendí de mi amigo malabarista Ron Graham cuando le visité el año pasado en los Bell Laboratories, en Murray Hill, New Jersey. ¿Llevas una calculadora de bolsillo?".



Shiva, dios de la danza, esculpido en bronce en la India hacia el 1000 d. C.

"No voy nunca sin una calculadora o sin una baraja de cartas", dije sacando de mi camisa una calculadora común de ocho dígitos.

El Dr. Matrix me dio un bloc, y me pidió que apuntara dos números reales positivos cualesquiera. Escribí el pi y el 76. Me dijo que sumara uno al segundo y que dividiera la suma por el primero para obtener el tercer número de la sucesión. Puse el 76, le sumé 1 y dividí el 77 por 3.1415926; el resultado dio 24,509861. Para obtener el cuarto número repetí el proceso recursivamente: sumar 1, luego dividir por el número anterior. El resultado dio 0,335656. El quinto número fue 0,0544946.

"Ahora", dijo el Dr. Matrix, "a partir de esto podría creerse que si se continúa aplicando el algoritmo se irán obteniendo números cada vez más horribles. Pero inténtalo otra vez y verás".

Me quedé pasmado. El número siguiente fue pi. En realidad, leí el 3,1415931, porque se habían acumulado pequeños errores en la máquina. El Dr. Matrix me aseguró que cuando todos los cálculos se hacen de un modo exacto la serie es periódica de período cinco. Es fácil de demostrar, pero dejo la demostración como un problema que responderé el mes que viene.

El Dr. Matrix nos mostró otras varias curiosidades del cálculo respecto del número cinco. Pero sólo me queda margen para otras más: entrar el número 555 y dividirlo cinco veces por cinco. Los resultados son 111, 22,2 4,44, 0,888 y, por último, el año de la independencia de Estados Unidos: 0,1776. Intenté empezar con una fila de tantos cincos cuantos pudieran entrar en la calculadora.

"¿Y el quinto principio?", preguntó Sam, que había estado tomando nota.

"Es nuestro principio supremo. Lo revelamos solamente una vez que un estudiante ha hecho su quinto pago".

"¿Qué está sucediendo allí?", pregunté señalando el cilindro azul.

"Algo que no es", respondió el Dr. Matrix. "Levanta el tubo suavemente".

Cuando lo hice no podía creer lo que mis ojos veían, la copa y lo que contenía habían desaparecido. Examiné el cilindro, no había nada sospechoso. Sam sonreía enigmáticamente. Más tarde me dijo que él mismo, había inventado recientemente aquel truco. El Dr. Matrix debía haberlo aprendido de algún ilusionista local. ¿Podrá el lector adivinar el modus operandi antes que yo lo revele el próximo mes?

"La copa y el vino no han existido nunca", dijo el Dr. Matrix, "eran solamente ilusiones"; sonrió con la ironía del no-ser. "Pero dejadme que os enseñe algo que os va a gustar aún más: una de las viejas danzas de Kali."

Nos condujo fuera de su despacho y bajamos por un corredor hacia un pequeño teatro redondo, tomando asiento en el anfiteatro.

De alguna parte venía el sonido nasal de una *raga* hindú tocada por instrumentos nativos. El ritmo parecía ir increscendo, pero no era más que una ilusión. De repente, Iva apareció en el pequeño escenario. Su única vestimenta era un espejo pentagonal en su ombligo que centelleaba y lanzaba luz de color rubí, mientras su torso se balanceaba de un lado a otro en una danza sensual de indescriptible belleza. Bajo la luz escarlata su piel aparecia tan negra como la piel de Kali.

"Zuleika está desnuda de arriba y de abajo", dijo el Dr. Matrix, "para recordarnos que tenemos que despojarnos de todas las ilusiones; el mundo no tiene ni principio ni fin, ya no existe".

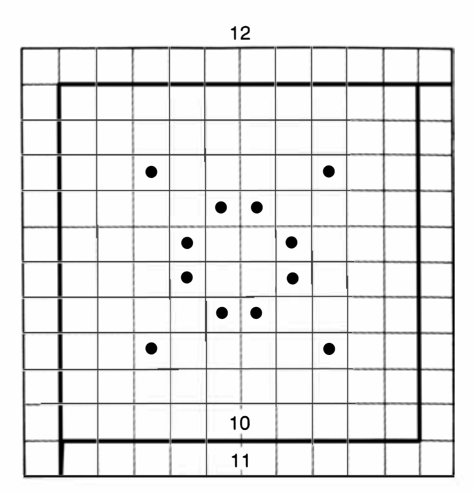
Sam y yo aplaudimos con entusiasmo cuando la danza acabó. "¡Viva la ilusión!", aclamé adelantándome para dar a Iva un abrazo de felicitación. Mis brazos se doblaron en el aire. La imagen de ella había desaparecido, pero podía oír su "risa" a distancia. Todo ello era un truco de escenario producido por espejos cóncavos escondidos.

Iva volvió a la ciudad con Sam y conmigo; los tres cenamos en un restaurante japonés cerca de Grand. "Comamos, bebamos, y seamos felices, dijo Sam mientras tomábamos nuestros primeros combinados, "porque nada es real".

"Y porque", añadió Iva, "mañana podría estar a dieta".

Nos dijo que su padre estaba organizando una gran campaña para 1977 con la idea de promocionar la MP en Estados Unidos. La campaña será dirigida por Bagel Lox, un antiguo vicepresidente de la Dr. Pepper Company, Jerry Rubin, Mrs. y Mr. John Lennon, Doug Henming y Mia Farrow ya habían visitado el templo de Calcuta (todos los gastos pagados) y se habían vuelto conversos entusiastas. John Denver estaba escribiendo una canción sobre MP que llevará por título "No te preocupes por lo que no es".

Me habría quedado más tiempo en Calcuta, si Iva y su padre no hubieran planeado irse a los pocos días para visitar el yate de L. Ron Hubbard, que había entrado en la Bahía de Bengala para anclar en Calcuta. Antes de despedirme de la triste, y bonita a su manera, ciudad, Iva me dio una ficha en la que había escrito mi *mantra* secreto.



Solución del problema del mes pasado

Cuando mi avión ascendía sobre el "in-existente" océano, encargué un martini y miré una vez más mi *mantra. Ohwataboo-biam.* Mi conciencia se estaba alterando por un segundo combinado antes de que me diera cuenta de su significado. Me imaginé que oía a Iva riendo, pero era sólo una ilusión auditiva.

Los problemas de combinatoria del mes pasado tienen las siguientes respuestas:

Rompecabezas Klondike. La solución de Sam Loyd es única si el "inoportuno 2" se cambia por el 1. Es fácil mostrar que cualquier otro dígito distinto de cero en esta célula da una posible vía de escape. Los dígitos 4, 5, 6, 8 y 9 conducen inmediatamente a la salida, el 3 permite escapar en tres pasos hacia el suroeste y el 7 permite escapar en dos pasos hacia el oeste.

El juego de las damas chino. Diez bolas sobre el tablero de juego de damas chino pueden llevarse al área opuesta en 27 movimientos:

1. 115-106
2. 120-115-93
3. 116-105-82
4. 82-72
5. 118-105-82-63
6. 121-116-105-82
7. 114-94-71-73-53
8. 53-42
9. 112-114-94-71-73-53-30
10. 119-114-94-71-73-53
11. 106-81-83-62-43-41-18
12. 18-9
13. 113-114
14. 117-106-81-83-62-43-41-18-5
15. 9-8
16. 114-106
17. 106-81-83-62-43-41-18
18. 72-54-52-31-9-2
19. 93-72-54-52-31-9-7
20. 82-72
21. 72-54-52-31-9
22. 42-17-6-4-1
23. 63-42-17-6
24. 53-42
25. 42-17-4
26. 30-10-3
27. 18-10

La solución es palindrómica: la segunda mitad es la imagen especular de la primera.

El problema de no-tres en raya, mínimo. El modelo de la ilustración aquí representada da un mínimo de 12 fichas para tableros de lado 10, 11 y 12.

Taller y laboratorio

Construcción de un generador electrostático de Van de Graaff

C. L. Stong

La era moderna de la electrostática comenzó en 1929. En dicho año, un joven estudiante llamado Robert J. Van de Graaff, procedente de la Universidad de Oxford y que estaba trabajando en Princeton como becario, inventó el generador electrostático de cinta que actualmente se designa en todas partes con su nombre. El becario estaba interesado en obtener un potencial eléctrico elevado, continuo y constante, para acelerar partículas atómicas con objeto de bombardear núcleos y conseguir información acerca de su estructura.

Hoy en día, el acelerador de Van de Graaff puede verse en todo laboratorio importante de física nuclear de cualquier país; es el caballo de batalla para cualquier investigación precisa en dicho campo. El acelerador ha conseguido dar a las partículas energías superiores a ocho millones de voltios, y no es imposible que esta cifra se duplique. La máquina, en tamaño reducido, ha encontrado una amplia variedad de aplicaciones, en especial en las instalaciones de alta tensión para tratamientos médicos con rayos X.

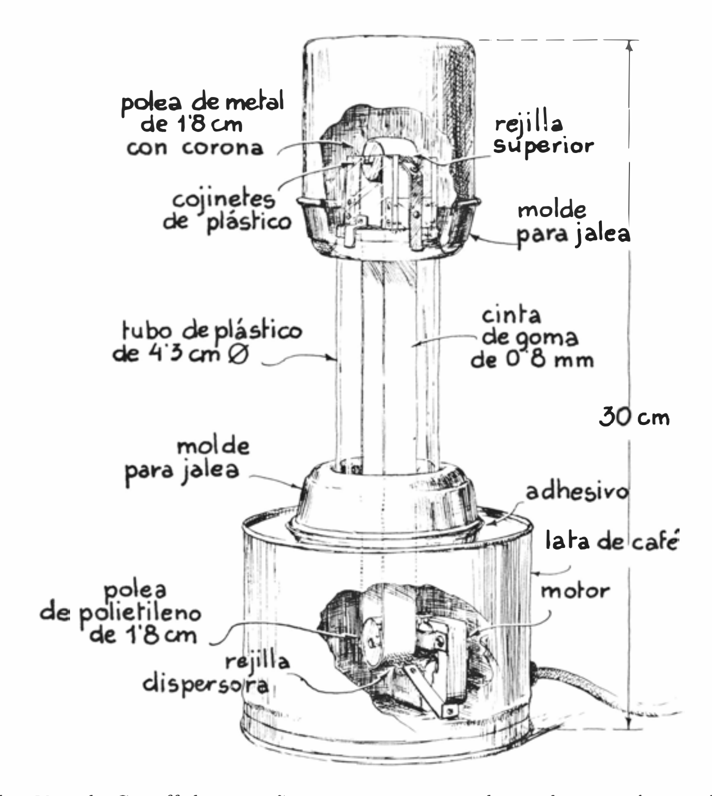
Entre las características más atractivas del generador de Van de Graaff están su relativa sencillez y su bajo coste. Robert W. Cloud, del laboratorio de investigación de altas tensiones del Instituto de Tecnología de Massachusetts, ha diseñado un modelo de tamaño reducido como un proyecto de construcción para aficionados *(véase la ilustración de la página derecha)*. Su funcionamiento es tan simple como su diseño. Un motor que va a 3000 revoluciones por minuto está alojado dentro de una lata de café vacía. Acciona una cinta de goma que pasa por una polea aislada y se introduce dentro de un cabezal superior. En cada extremo y cerca de la superficie de la cinta están situadas, rejillas, terminadas en pinceles, que actúan como peines colectores, conectadas cada una de ellas con sus respectivos terminales.

Cuando la máquina se pone en marcha, el rozamiento arranca electrones de la cinta en el extremo inferior motriz y los deposita sobre la polea de plástico. Las cargas positivas, remanentes en los lugares de la cinta que han perdido electrones, son llevadas por la cinta a la polea metálica situada en el extremo superior. Los electrones de la polea metálica pasan a la cinta, que es deficitaria en tales cargas. A medida que la máquina va funcionando, se acumulan fuertes cargas opuestas en las poleas.

Después de unos segundos o minutos, según sea la humedad ambiente, el campo originado en las poleas alcanza un valor suficiente para ionizar el aire cerca de las rejillas pincel colectoras. Un flujo de electrones pasa entonces del terminal superior hacia la cinta, que inicia su marcha hacia abajo. De modo semejante, los electrones transportados por la cinta entran en la región de ionización de la rejilla inferior y, a través del soporte de ésta, pasan al terminal inferior.

Mediante esta acción de bombeo, la cinta extrae continuamente electrones del terminal superior y los descarga hacia tierra pasando por el terminal inferior. Esto ocasiona una ganancia de carga positiva en el terminal superior que, a causa de la repulsión mutua de los "huecos" positivos, se distribuye uniformemente sobre su superficie exterior. Como consecuencia, no quedan cargas en la superficie interna. Teóricamente, la tensión eléctrica entre los terminales superior e inferior debería crecer indefinidamente.

Como en el caso de las máquinas eléctricas clásicas, en la práctica la carga alcanzada tiene un límite impuesto por la calidad del aislamiento. Cuando se llega a una tensión de unos 100.000 vol-



Generador Van de Graaff de pequeña potencia construido con latas vacías, moldes de repostería, un tubo de plástico y un motor de juguete. Tensión alcanzable: 50.000 volt.

tios, la carga se escapa como descarga en corona desde el terminal superior y como corriente de conducción a lo largo de la columna aislante, con un ritmo igual a los dos microamperios que es capaz de llevar la cinta transportadora. Aunque 100.000 voltios sea una cifra impresionante, la máquina no ofrece peligro, pues la capacidad del terminal superior para almacenar carga es pequeña.

Si se acerca un objeto esférico hasta una distancia de unos pocos centímetros del terminal superior de alta tensión, salta una pequeña chispa. En este tipo de descarga, el aire pasa rápidamente de ser un buen aislante a convertirse en conductor y la chispa descarga por completo el terminal. La reducción de la tensión de éste hace que el aire recupere su poder aislante y el terminal vuelve a ser cargado por la cinta. En cambio, si se acerca a dicho terminal un objeto con cantos vivos, se produce una descarga en corona que va quitando la carga y el potencial decrece de un modo paulatino. Tal dispositivo, con un espaciado ajustable, se usa a menudo en los generadores de Van de Graaff para mantener un potencial constante en el terminal.

El disponer de una fuente de alta tensión y corriente continua invita a realizar experimentos con la misma. Uno de los más divertidos es el de las bolas saltarinas. Se toma una media docena de bolas de corcho cuya superficie se hace conductora recubriéndolas con hollín o grafito. Se construye una caja con una tira de plástico transparente enrollada en forma de cilindro, que tiene por bases dos tapas metálicas, tales como las usadas en botes de alimentos. Las tapas se conectan a los terminales del Van de Graaff después de colocar las bolas en el interior de la caja. Cuando la máquina está en marcha, el campo electrostático hace que las bolas suban y choquen con la tapa superior, a la que entregan su carga de electrones, con lo cual caen, y el ciclo se va repitiendo mientras la máquina esté en marcha.

Sosténgase una aguja de coser mediante un aislante y conéctese la aguja al terminal superior de la máquina. La punta de la aguja lanza moléculas de aire ionizado como si de un chorro de gas a presión se tratara. Con ellas puede apagarse fácilmente una cerilla o una vela. Tal viento eléctrico puede emplearse para mover un motor rudimentario. Se toma una hoja de aluminio y de ella se recorta una cruz en forma de esvástica, con extremos bien puntiagudos. Con la punta de un lápiz se produce una indentación en su centro. Este se apoya en la punta de un clavo que atraviesa un trozo de cartón que le sirve de soporte. De este modo, la esvástica puede girar fácilmente en torno a la punta del clavo y lo hace vigorosamente cuando se conecta el clavo con el terminal de alta tensión del generador de Van de Graaff. El aire ionizado que fluye por las cuatro puntas proporciona la fuerza reactiva como en una turbina.

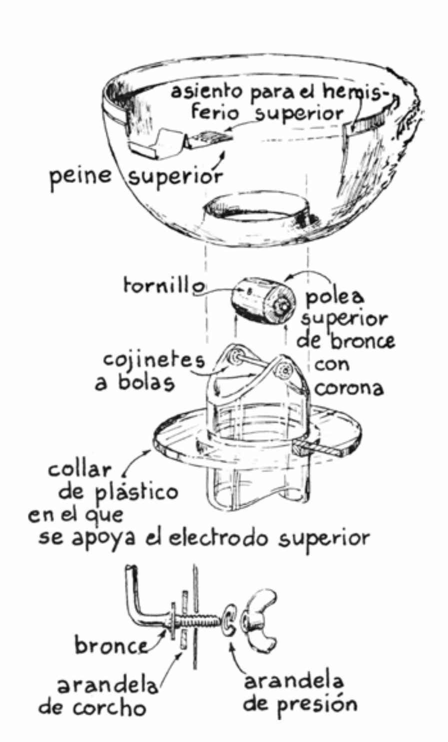
El generador de Van de Graaff es capaz de conferir a una persona una tensión de 50.000 voltios. Esta cifra supera en 20.000 voltios el potencial necesario para ionizar el aire a la presión atmosférica. Esto es suficiente para conseguir mantener de punta los cabellos del experimentador. Para demostrar este efecto, se pone uno de pie sobre un gran recipiente de vidrio o sobre una plataforma de madera sostenida por cuatro envases de vidrio de boca ancha. Unos segundos después de que el experimentador se mantenga en contacto con el terminal de alta tensión, observará cómo sus cabellos empiezan a levantarse. El cuerpo añade capacidad al terminal, de modo que la acumulación de carga eléctrica es superior a la normal. Al bajar, o al tocar un cuerpo unido a tierra, se experimenta una ligera sacudida, que no es peligrosa para una persona de salud normal.

Las lámparas fluorescentes lucen de modo brillante cuando se toca con ellas el terminal de alta tensión. Si la habitación no es muy clara, las lámparas de filamento también lucen, con colores diversos según el gas que contengan en su interior. Puede obtenerse una aurora boreal en miniatura hirviendo agua en un balón de vidrio hasta que el vapor haya desplazado el aire de su interior y cerrándolo seguidamente con un corcho. Una vez condensado parte del vapor, el aire enrarecido que queda en el interior muestra una luminiscencia verde rosada cuando el frasco toca el Van de Graaff.

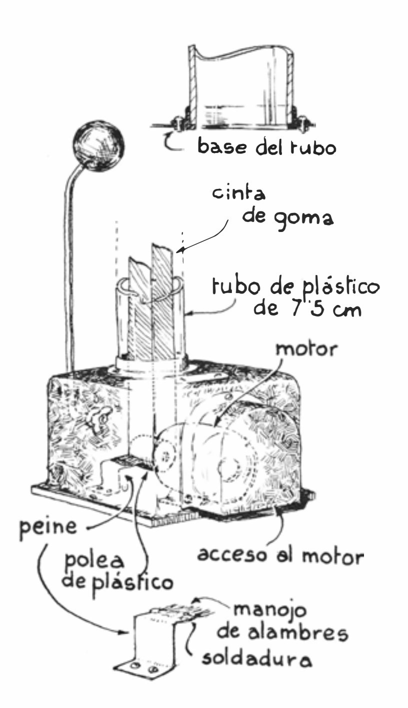
Quienes posean un equipo capaz de crear un alto vacío pueden intentar construir y operar un acelerador lineal y otros aparatos afines relacionados con la investigación nuclear. Tales proyectos, como los de construcción de ciclotrones caen dentro de las posibilidades de los aficionados, sobre todo si trabajan en grupos, pero no deben ser emprendidos alegremente.

Para accionar tales aparatos se requiere un Van de Graaff algo mayor que el descrito *(ilustración inferior de la página 104)*. Difiere de éste en varios detalles importantes. Los puntos dispersores que cargan la cinta en su parte ascendente deben ser alimentados con un potencial de 5000 a 10.000 voltios obtenido con un conjunto transformador-rectificador. Las máquinas potentes emplean poleas metálicas en ambos extremos de la cinta, de las cuales la superior permanece aislada del terminal de alta tensión.

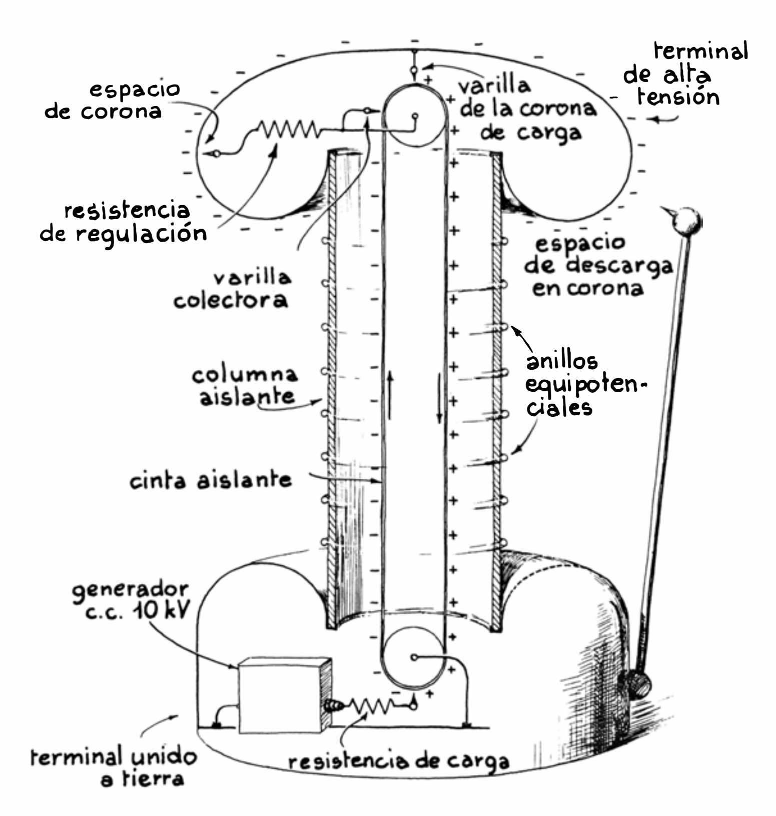
La carga es lanzada sobre la cinta cuando pasa a través de la descarga en



Detalles de un diseño ligeramente distinto correspondientes al terminal superior del pequeño generador de Van de Graaff



Detalles de la polea y del motor de la parte inferior del generador de Van de Graaff



Representación semiesquemática de una máquina de Van de Graaff potente

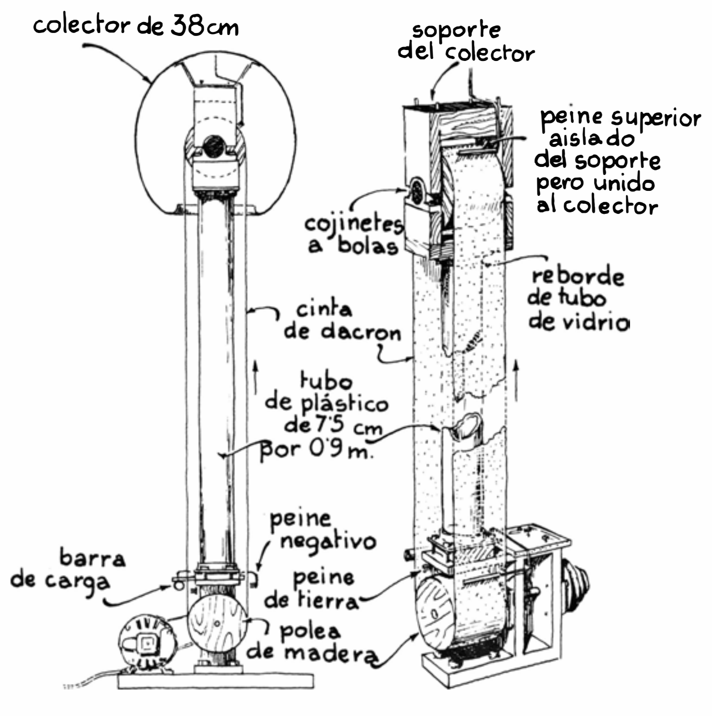
corona existente entre los puntos inferiores y la polea impulsora, que está conectada a tierra. Unos puntos semejantes se encuentran dentro del terminal superior y recogen las cargas de la cinta ascendente, que son llevadas a la polea superior. Después de un corto período inicial, la polea superior adquiere una tensión elevada y pasa una corriente hacia el terminal superior a través de una resistencia de regulación. En este circuito, puede incluirse también un trayecto de descarga en corona cerca de la superficie interna del terminal. Encima de la polea hay una segunda serie de puntos dispersores (varilla de carga), conectados directamente al terminal de alta tensión. La diferencia de potencial entre la polea superior (que es activa gracias a la caída de tensión producida por la corriente que pasa por la resistencia de regulación y la corona) y el terminal de alta tensión motiva que estos puntos dispersen una carga de signo opuesto sobre la parte descendente de la cinta. Se elige el valor de la resistencia de regulación de forma que los dos lados de la cinta trabajen equilibrados. El valor de dicha resistencia puede averiguarse de un modo aproximado aplicando la ley de Ohm. (En máquinas pequeñas es del orden de 40 megohmios.) Las cintas para las máquinas potentes suelen ser de tejido engomado y marchan a una velocidad comprendida entre 1200 y 1800 metros por minuto.

La capacidad del terminal superior para almacenar cargas depende de su tamaño. Su aptitud para mantener las cargas varía con su forma. El terminal ideal debería ser esférico, pero por desgracia no puede ser así, ya que debe haber sitio para la entrada de la cinta. La forma debe elegirse de tal modo que la intensidad del campo eléctrico sea siempre menor que el valor para el cual se inicia la descarga en corona o la chispa. Por ello, la abertura debe tener bordes entrantes y las caras enfrentadas de los terminales superior e inferior deberían ser idénticas. Los terminales se suelen fabricar con aluminio laminado.

En la actualidad, los generadores de Van de Graaff algo mayores, en el dominio del millón de voltios, que se destinan a aplicaciones científicas o industriales, suelen montarse todos dentro de un tanque de acero que contiene freón, anhídrido carbónico o un gas análogo a una presión de bastantes atmósferas. La alta presión sirve para aumentar el poder aislante del aire y de este modo crecen las capacidades de tensión y de corriente de la máquina.

En las máquinas de Van de Graaff diseñadas para tensiones superiores a 200.000 voltios es importante la distribución de cargas a lo largo de la columna aislante (e incluso a lo largo de la cinta móvil). Las columnas de las máquinas aisladas con aire, que usen cintas de más de diez centímetros de ancho, deben ser provistas de anillos equipotenciales dispuestos a lo largo de la columna y espaciados unos cinco centímetros entre sí.

¡ATENCION! Cualquiera que emprenda la construcción de un generador de Van de Graaff potente no debe perder de vista que no se trata de un juguete.



Generador de Van de Graaff con cinta exterior y excitación interna

Estas máquinas, que son potencialmente letales, pueden revelar maravillas que Otto de Guericke nunca hubiera podido imaginar, pero, a diferencia de su bola de azufre, encierran dentro de sí la fuerza del rayo.

F. B. Lee, de Kenmore, Nueva York, nos aporta más datos sobre estas máquinas. Dos detalles importantes para el diseño de los generadores Van de Graaff son: 1.º el paso de 300 cm² de cinta por segundo por las poleas produce, aproximadamente, una corriente de un microamperio; 2.º la tensión máxima desarrollada es igual a 28.000 veces el valor del menor radio de curvatura del colector expresado en centímetros.

De este modo, una esfera de 30 centímetros de diámetro podrá alcanzar un límite teórico de 420.000 voltios. Los orificios existentes en la esfera, y que son necesarios para la entrada de la cinta, alteran las características del campo eléctrico y reducen el máximo teórico. La forma más eficaz para un colector práctico es la de un esferoide ligeramente achatado en su fondo, con radios de curvatura mínimos localizados a una distancia razonable del aislante para impedir que se produzcan chispas a lo largo de la superficie del aislante.

La tensión máxima elegida por el autor del diseño determina el tamaño del colector. Para conseguir alcanzar una fracción importante de la tensión límite teórica, el colector debe estar separado de las demás partes metálicas por lo menos una distancia igual a dos o tres diámetros. La distancia debería ser mayor si hubiera partes metálicas con cantos agudos. Puede ser algo menor si todas las partes están cubiertas por un blindaje metálico redondeado de gran radio de curvatura. La anchura del orificio por el que entra la cinta en el interior del colector no debe ser mayor que la mitad del diámetro del propio colector y la abertura debería estar curvada hacia dentro con un radio de curvatura amplio.

Aunque si el metal está muy pulido el colector resulta más vistoso, ello no es esencial. Las pequeñas imperfecciones de la superficie limitan poco la tensión máxima alcanzable, si está bien redondeada. Deben evitarse los cantos agudos y las rebabas. Las hilas y partículas de polvo pueden reducir la tensión hasta en un 40 por ciento del máximo teórico si sobresalen de la superficie un uno por ciento del radio.

El aluminio laminado comercial sin pulir, libre de hilas y de polvo, puede recoger cerca del 85 por ciento del máximo teórico. Un buen pulido aumenta la tensión en un uno por ciento. La concentración de carga en torno al orificio de entrada de la cinta absorbe el 14 por ciento restante, cantidad que varía desde luego con el tamaño del orificio y su distancia a los otros conductores.

El valor que se quiere que tenga la corriente de salida determina el tamaño de la cinta y la velocidad a que debe moverse.

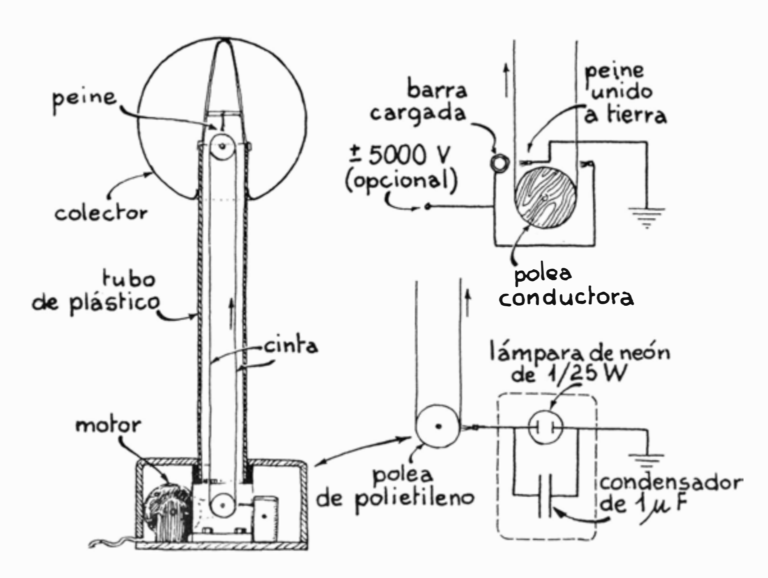
El fijar esta especificación no es tan simple como parece, porque las propiedades de los materiales utilizados fijan límites de velocidad tanto para la cinta como para los cojinetes. En teoría, para conseguir la máxima corriente debería emplearse la mayor velocidad posible de la cinta. Pero cuando la velocidad de la cinta supera los 30 metros por segundo, surgen inconvenientes.

Las grandes velocidades aumentan la tendencia al desgaste en los bordes de la cinta y a que ésta se desempalme. Con velocidades elevadas, hay que tensar mucho la cinta, sobre todo si las poleas son pequeñas, y esto ocasiona problemas en los cojinetes. Las dificultades de lubricación limitan la velocidad de los ejes a unas 5000 revoluciones por minuto en los cojinetes de fricción. El nivel de ruido de los cojinetes a las bolas se hace muy molesto por encima de esta velocidad, a no ser que se tomen precauciones especiales para reducirlo. Con velocidades de la cinta superiores a 30 metros por segundo, las pérdidas de potencia debidas al rozamiento con el aire son ya apreciables. Además, parte de la carga parece ser expulsada de la cinta cuando las velocidades son excesivas, fenómeno para el cual carecemos de explicación.

Las cintas se fabrican con cualquier material aislante: papel, tela, goma, plástico, etc. La goma, que es poco resistente al ozono, tiene una vida limitada, pero como puede obtenerse de neumáticos usados a un coste nulo, es difícil que tenga competencia. El rayón, nilón, dacrón y los tejidos ·unidos con adhesivos) son casi tan buenos como la goma. Cuando se usan estos materiales, hay que modificar la posición de los pinceles colectores de la corona. Las cintas de tejido duran más que las de goma, son más silenciosas y necesitan menos potencia de tracción, pero tienden a deshilacharse en los bordes. Esto se puede arreglar con un poco de laca. Teniendo en cuenta todos los factores, preferimos las cintas de neopreno empalmadas en diagonal.

La polea superior debe ser de un material eléctricamente buen conductor, tal como la madera o la baquelita. No extrañe tal afirmación: a estas tensiones tan altas tales materiales son muy buenos conductores para las débiles corrientes que se presentan. Una buena polea de madera puede obtenerse a base de serrín aglomerado con cola. La polea inferior debe ser también buena conductora de la electricidad si se emplea un generador auxiliar de 5000 a 10.000 voltios para dispersar la carga sobre la cinta.

Si la máquina es autoexcitable (es decir, si la cinta se carga eléctricamente por rozamiento), la polea inferior debe ser construida o estar recubierta con un material aislante de elevada resistividad. Una capa de polietileno de 0,8 mm de espesor constituye un excelente recubrimiento para las pequeñas poleas de madera. Las poleas deben ser torneadas con una ligera corona en cuyo borde se apoya el tubo de polietileno. Este puede obtenerse cortando una botella cilíndrica de este material. El tubo se introduce a presión sobre el núcleo de madera.



Generador de Van de Graaff con cinta interior y excitación externa

En las máquinas autoexcitadas, la elección del material de la polea y de la cinta determina la polaridad de la carga del colector. Una cinta de goma con una polea inferior de polietileno o de poliestireno extrae electrones del colector y éste se carga positivamente.

Las cintas pueden moverse por dentro o por fuera del soporte aislador. La economía, la sencillez y el disponer de corrientes intensas resultan beneficiadas con el empleo de cintas exteriores. En cambio, el aspecto externo de la construcción es mejor con cintas interiores. El primer tipo de soporte permite el uso de un aislante pequeño, relativamente barato, con pérdidas de corriente reducidas y deterioro mínimo ocasionado por la descarga en corona (a causa del ozono). Esto permite el empleo de cintas más anchas para una abertura dada del colector. Se reducen también al mínimo los problemas que proceden de desigualdades de potencial a lo largo del aislador.

Al elegir el material de la columna aislante hay que evitar el empleo de sustancias higroscópicas o fibrosas, pues de lo contrario se producirían pérdidas a través de la humedad que se formaría en su superficie. Hay que tener también en cuenta sus propiedades mecánicas, tales como tenacidad, rigidez y dureza. Finalmente deben ser de precio razonable.

La tubería de fibra poliéster laminada o la de cloruro de polivinilo cumplen bien los requisitos expuestos y se encuentran disponibles en tamaños normalizados. El cloruro de polivinilo es el menos higroscópico y puede ser doblado y moldeado calentándolo hasta su punto de reblandecimiento por inmersión en parafina caliente.

Las puntas de peine o corona para aplicar la carga a la cinta pueden ser de índole muy variada. A menudo una simple aguja de gramófono actúa de una manera tan eficaz como la más elaborada púa. Un mechón de alambres, sujeto por un extremo y peinado como una escoba por el otro, actúa como un peine adecuado, al igual que lo hace un pequeño rectángulo de tela metálica.

Hay que tener cuidado en evitar la dispersión no conveniente de cargas sobre la cinta. Esto puede ocurrir si se mezclan las cargas de una y otra cara de la cinta cerca de las poleas. El problema se resuelve montando los peines sobre accesorios que permitan su ajuste fácil en una amplia variedad de posiciones y seleccionando los tamaños de los peines para restringir las áreas sobre las que se dispersan las cargas.

Libros

Los discursos de Galileo como primer paradigma de la física

Manuel García Doncel

CONSIDERACIONES Y DEMOSTRACIONES MATEMATICAS SOBRE DOS NUEVAS CIENCIAS, Galileo Galilei. Edición preparada por C. Solís y J. Sádaba, Editora Nacional, Madrid 1976. Se trata del texto íntegro en castellano de los llamados "Discorsi" de Galileo, es decir, de su segundo diálogo, cuyo título original es *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno à due nuove scienze, attenenti alla mecanica e i movimenti locali.* La aparición modesta de este libro de bolsillo, nos invita a reflexionar sobre el papel fundamental que ha representado en la génesis de las ciencias modernas. En la jerga de la actual epistemología genética de las ciencias (T. S. KUHN "The Structure of Scientific Revolutions", The University of Chicago Press, Chicago ²1970; en castellano, *La estructura de las revoluciones científicas,* Fondo de Cultura Económica, México, 1971), se entiende por "paradigma" una de esas publicaciones científicas de punta, que rompe moldes e introduce una manera radicalmente nueva de atacar problemas científicos candentes. Una vez aceptado por la correspondiente comunidad científica internacional, el paradigma se explicita en "matriz disciplinar", dando las reglas de juego de una ciencia nueva, o sustituyendo revolucionariamente las de la ciencia anterior. En este sentido podemos afirmar que los "Discorsi" constituyen el paradigma primero, creador de las ciencias físicas.

La "physica" pregalileana consistía (en continuidad con la "physiologia") en un estudio filosófico de la "physis", es decir, de la naturaleza. Era un estudio fundado ciertamente en la observación, pero preocupado únicamente por explicar las causas del cambio ("motus") de los cuerpos. La nueva física se constituirá, a partir de Galileo, como prototipo de ciencias "empírico-formales", en las que el lenguaje matemático es fundamental para interpretar la experiencia. Galileo lo había formulado en un párrafo famoso: "La filosofía está escrita en este libro inmenso que se encuentra continuamente abierto ante nuestros ojos (quiero decir el universo), pero que no puede entenderse si no se aplica uno primero a entender su lengua, a reconocer los caracteres en los que está escrito. Está escrito en lengua matemática, y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin cuyo medio es humanamente imposible entender una palabra. *(Il Saggiatore,* Le Opere di Galileo Galilei, Ed. Naz., t. VI, p. 232.)

La física de Galileo se formulará pues matemáticamente, aunque mediante unas matemáticas para nosotros muy elementales, reducidas a la proporcionalidad y a una simple geometrización de las magnitudes físicas. Con ese formalismo escrutará el universo, que se encuentra no sólo ante sus ojos en la observación, sino también al alcance de sus manos en la experimentación. Esta característica distinguirá la nueva física de la vieja astronomía.

Los "Discorsi" constituyen la obra de madurez del Galileo recluido en su villa de Arcetri. Publicados en Leyden en 1638, cuatro años antes de su muerte, Galileo ya totalmente ciego ni siquiera pudo llegar a verlos impresos. En ellos recoge las investigaciones realizadas a lo largo de su vida, dentro de ese campo forzosamente acotado, que definirá las nuevas ciencias físicas. La limitación le había sido impuesta al anciano Galileo, al condenar la Inquisición sus concepciones astronómicas. En ese sentido, y sin duda sólo en él, podemos ver un fruto positivo en el penoso proceso de 1633.

Esta obra está redactada en forma de diálogo, en el que intervienen los tres mismos personajes de su primer "diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo". Simplicio es el filósofo aristotélico, poco familiarizado con los razonamientos matemáticos, pero preocupado siempre del aspecto objetivo de investigación de la naturaleza. Salviati es portavoz de las nuevas concepciones galileanas Sagredo es el filósofo sano, abierto a la nueva problemática, y dispuesto a asimilar las nuevas concepciones en cuanto logra resolver sus razonables dificultades. A veces parece representar los esfuerzos primerizos del joven Galileo.

El diálogo está distribuido en cuatro jornadas muy desiguales. Las dos primeras desarrollan la primera de las dos nuevas ciencias, la llamada "mecánica", y las otras dos la segunda, la "ciencia del movimiento local". La mecánica de que habla Galileo está aún lejos de lo que hoy entendemos por ese nombre y nacerá medio siglo más tarde con los "Principia" de Newton. Galileo habla de mecánica en el sentido de técnica artesanal, empleada en las grandes construcciones. Ambienta así el diálogo en los astilleros venecianos, para partir de una curiosa pregunta inicial: ¿por qué los artefactos grandes, como los andamiajes de las grandes galeras, resultarían endebles si se realizaran como simple reproducción a mayor escala de los artefactos pequeños? Esto plantea el problema de la cohesión de los materiales, y su imposible explicación por la pura repugnancia de la naturaleza a producir vacío en la ruptura. A este propósito se encabalgan una serie de digresiones sobre el vacío y su diseminación entre las últimas partes de la materia, sobre el continuo y su divisibilidad en infinitas partes, sobre el peso del aire y la resistencia que ofrece al movimiento, y por fin sobre las leyes del péndulo y de la cuerda vibrante. Son curiosidades interesantes, pero están formuladas de modo fenomenológico, con escasos razonamientos matemáticos. Más sistematizada aparece la segunda jornada, en la que, volviendo al tema inicial de la resistencia de los materiales a la ruptura, se enumeran una serie de proposiciones matemáticas. Son proposiciones basadas simplemente en la ley de la palanca, y en las que apenas intervienen más que las dimensiones geométricas de los cuerpos.

Lo históricamente importante son las dos últimas jornadas. En ellas se elabora la "cinemática" como ciencia del movimiento o cambio ("motus") local. Aquí el diálogo italiano se transforma en comentario a un texto latino. Así se expresa el pensamiento galileano de modo más elaborado, que será interpretado por las intervenciones de Salviati, y aun completado con referencias al testimonio del Académico, es decir, del propio Galileo que era miembro de la Academia dei Lincei desde 1611.

En la jornada tercera, después de una breve exposición del movimiento uniforme, se desarrolla ampliamente el tema

del "movimiento naturalmente acelerado", es decir, de la caída libre de los graves a partir del reposo. Aquí es donde el genio de Galileo crea el paradigma de la física matemática. Parte de un principio matemático formulado, la definición de movimiento uniformemente acelerado como aquel en que la velocidad va aumentando proporcionalmente al tiempo. Discute el carácter físico de esa conjetura, apoyándose en el criterio de simplicidad de la naturaleza. Y a partir de este principio deduce matemáticamente en su "Teorema II" la ley fenomenológica de la proporcionalidad de los espacios a los cuadrados de los tiempos. Para ello dibuja una simple gráfica de aspecto triangular en que aparecen como coordenadas el tiempo y la velocidad. Para subrayar el sentido abstracto de su geometría, dibuja junto a su gráfica un segmento disconexo que representa el espacio. Y el triunfo de su geometrización abstracta consiste en obtener, apoyándose en lemas previos, la integración gráfica de la velocidad, para obtener así el espacio en función del tiempo. Concluye su razonamiento físico proponiendo, como comprobación de esa ley fenomenológica, una experiencia genialmente elaborada, la caída libre a lo largo de un plano inclinado. Ese fragmento es realmente antológico por su simplicidad y su coherencia teórico-experimental. Le siguen una serie de problemas y teoremas, cerca de cuarenta en total, sobre disposiciones más complejas de caídas por planos inclinados.

La cuarta jornada trata del movimiento ("violento") de los proyectiles. Comienza con otro fragmento antológico, en el que tras recordar la definición de la parábola como cónica, demuestra el carácter parabólico de la trayectoria que sigue un proyectil al combinar sus movimientos uniforme y uniformemente acelerados. Siguen una serie de unos veinte problemas o teoremas sobre esos movimientos parabólicos de los proyectiles.

En estos textos paradigmáticos nace la física con toda su problematicidad epistemológica: significado teórico o experimental de los conceptos físicos, valor del criterio de simplicidad de la naturaleza, idealización de las experiencias, precisión experimental proporcionada a la madurez de las teorías... Por ejemplo, Galileo, según hemos visto, conoce bien el problema de la resistencia del aire al movimiento. Sin embargo desprecia esa resistencia en sus experiencias de caída libre de los graves. Y sin duda resulta despreciable, para sus toscas medidas de tiempo. Hoy sin embargo se realizan simples experiencias magistrales de caída libre en el aire con una precisión de decenas de microsegundos. La ley fenomenológica que mejor se ajusta a esas experiencias, no es la de proporcionalidad de los espacios a los cuadrados de los tiempos, sino al logaritmo del coseno hiperbólico de una expresión proporcional al tiempo, (J.A. BLACKBURN and R. KOENIG, *Precisión Falling body experiment,* Am. J. Phys., Vol. 44, p. 855; 1976). Si la experiencia del plano inclinado de Galileo se hubiera realizado con la precisión que él deseaba y nosotros podemos conseguir, ¿serían paradigmáticos esos textos, o más bien, con la precisión de esa experiencia se habría impedido la creación de la física? ¡Qué lejos quedan de eso los primitivos sueños del neopositivismo!

Estos textos son, sobre todo, de un enorme interés para la comprensión de la génesis histórica de la física. En ellos se pueden sentir los esfuerzos que ha necesitado realizar la humanidad para ir conquistando los conceptos físicos más elementales. Para Galileo los conceptos dinámicos de "ímpetu" y "momento", expresan muy confusamente lo que nosotros entendemos por fuerza, momento lineal y energía cinética. Su confusión de peso y masa le impide formular correctamente el principio de inercia, que vagamente sospecha. Pero ni aun la magnitud cinemática de "aceleración" está clara para él. Utiliza ese término en su simple sentido etimológico de acción de aumentar la celeridad (o velocidad).

El texto sobre la noción de movimiento naturalmente acelerado es además antológico para ilustrar la diferencia que existe entre la presentación lógica de una teoría científica y su obtención genética. Se ha demostrado con rigor histórico (A. KOYRÉ, *Études Galiléennes,* Hermann, París, 1966, p. 83-155) que Galileo descubrió la ley fenomenológica de la caída de los graves mucho antes de conocer la definición correcta de movimiento uniformemente acelerado. Más aún, según lo da a entender el diálogo de Sagredo con Salviati, se sabe que Galileo había aceptado por error, explicable en una concepción aristotélica del movimiento natural, una falsa definición de movimiento uniformemente acelerado (aumento de la velocidad en proporción al espacio recorrido). Sin embargo, por un segundo error en el razonamiento matemático, obtenía a partir de esa definición falsa la ley fenomenológica correcta. ¡Qué distinta había sido, pues, su conquista de esta ley de aquella su presentación paradigmática!

Nos congratulamos de que resulte tan asequible para el lector hispano el texto íntegro de ese primer sillar de nuestra ciencia moderna. Desearíamos que aparecieran otros, presentados con esa competencia. La traducción de Javier Sádaba es cuidada, aunque se hayan deslizado en ella algunos errores y algunos anacronismos en las formulaciones matemáticas de Galileo. Las introducciones y notas de Carlos Solís son valiosas histórica y epistemológicamente. Sólo encontramos exagerado el logicismo de algunos análisis, y el sensacionalismo al tratar del martirio de Galileo como símbolo del de otros intelectuales más modernos.

PLANTAS MEDICINALES, EL DIOSCORIDES RENOVADO, P. Font Quer, Labor, S.A., Barcelona 1976[3]. La historia de la medicina clásica tiene escuela entre nosotros. Desde todos los flancos, y por distintos especialistas, se han abordado casi todos los aspectos de su posible análisis. Luis Gil, Pedro Laín y Eulalia Vintró, por ejemplo, se han centrado en planos complementarios: la medicina popular, la medicina académica y el análisis textual de los testimonios más representativos. Entre las lagunas más obvias resta la farmacología. Y ello a pesar del enorme predicamento de que gozó en la Península Pedanius Dioscorides, autor de *De materia médica,* escrita hacia el 77, que consta de cinco libros y en la que se recogen excelentes descripciones de casi 600 plantas, amén de otros factores que intervienen en el proceso sanatorio.

El avance de la ciencia no posterga este tipo de obras, ni tampoco reduce su vigencia al coto de la historia. Prueba de ello es la edición norteamericana recentísima de la traducción que, comentándola, hiciera en el siglo XVI Pier Andrea Mattioli (Cfr. JOSEPH WOOD KRUTCH: *Herbal,* David R. Godine, Boston). Mattioli hizo varias ediciones e incorporó especies del Nuevo Mundo. En España se tradujo por primera vez en 1518 (Antonio Nebrija), pero la que dio valor y difusión sería la versión de Andrés Laguna, que siguió la pauta de Mattioli.

Pío Font Quer fue un eximio naturalista, maestro de botánicos. Recogió en esta obra, profusamente ilustrada a todo color y en blanco, la tradición dioscorídea, completándola con ajustadas introducciones científicas actuales y una breve reseña histórica del poder terapéutico de las distintas especies. La obra se divide de acuerdo con la sistemática y taxonomía vigente.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

RECURSOS MUNDIALES Y CLASE MEDIA

RESOURCES AND MAN: A Study and Recommendations. Committee on Resources and Man of the Division of Earth Sciences, National Academy of Sciences-National Research Council W. H. Freeman and Company, 1960.

MAN AND THE ECOSPHERE: Readings from Scientific American. W. H. Freeman and Company, 1971.

ECONOMICS OF THE ENVIRONMENT: Selected Readings. Editado por Robert Dorfman y Nancy S. Dorfman. W. W. Norton and Company, Inc., 1972.

THE HUMAN POPULATION: A Scientific American Book. W. H. Freeman and Company, 1974. Edición española: Editorial Labor, Barcelona 1976.

LA GUERRA NUCLEAR LIMITADA

THE EFFECTS OF NUCLEAR WEAPONS. Dirigido por Samuel Glasstone y preparado por el United States Department of Defense. United States Atomic Energy Commission (U.S. Government Printing Office), 1964.

NUCLEAR STRATEGY AND NUCLEAR WEAPONS. Barry E. Carter en *Scientific American*, vol. 230, n.º 5, págs. 20-31; mayo, 1974.

ANALYSES OF EFFECTS OF LIMITED NUCLEAR WARFARE: SEPTEMBER, 1975. Subcommittee on Arms Control, International Organizations and Security Agreements of the Committee on Foreign Relations, United States Senate. U.S. Government Printing Office, 1975.

METABOLISMO DE LOS GLICERIDOS EN EL TEJIDO ADIPOSO

LIPID METABOLISM, OBESITY AND DIABETES MELLITUS: Impact Upon Atherosclerosis, Editado por R. Levine y E. F. Pfeiffer en *Hormone and Metabolic Research*, series suplementarias n.º 4, Georg Thieme Publishers Stuttgart, 1974.

CALCULATION OF LIPOLYSIS AND ESTERIFICATION FROM GLYCEROL METABOLISM IN RAT ADIPOSE TISSUE. E. Herrera y A. Ayanz en *Journal of Lipid Research*, vol. 13, págs. 802-809; 1972.

LIPID BIOCHEMISTRY, AN INTRODUCTION, M. I. Gurr and A. T. James, segunda edición, Chapman and Hall London, 1975.

THE EFFECT OF GLUCOSE, INSULIN AND ADRENALINE ON GLYCEROL METABOLISM *IN VITRO* IN RAT ADIPOSE TISSUE, M. C. Domínguez y E. Herrera, *The Biochemical Journal*, vol. 158, págs. 183-190; 1976.

LOS PROCESOS REPETITIVOS EN EL DESARROLLO DEL NIÑO

THE CHILD AND MODERN PHYSICS. Jean Piaget en *Scientific American*, vol. 196, n.º 3, págs. 46-51; marzo, 1957.

PLASTICITY IN SENSORY-MOTOR SYSTEMS. Richard Held en *Scientific American*, vol. 213, n.º 5, págs. 84-94; noviembre, 1965.

EL CONFINAMIENTO DE LOS QUARKS

NEW EXTENDED MODEL OF HADRONS. A. Chodos, R. L. Jaffe, K. Johnson, C. B. Thorn y V. F. Weisskopt en *Physical Review D*, vol. 9, n.º 12, págs. 3471-3495; junio 15, 1974.

ASYMPTOTIC FREEDOM: AN APPROACH TO STRONG INTERACTIONS. H. David Politzer en *Physics Reports*, vol. 14C, n.º 4, págs. 129-180; noviembre, 1974.

DUAL-RESONANCE MODELS OF ELEMENTARY PARTICLES. John H. Schwarz en *Scientific American*, vol. 232, n.º 2, págs. 61-67; febrero, 1975.

MASSES AND OTHER PARAMETERS OF THE LIGHT HADRONS. T. DeGrand, R. L. Jaffe, K. Johnson y J. Kiskis en *Physical Review D*, vol. 12, n.º 7, págs. 2060-2076; octubre 1, 1975.

CORRIENTES DE CONVECCION EN EL MANTO TERRESTRE

FINITE AMPLITUDE CONVECTIVE CELLS AND CONTINENTAL DRIFT. D. L. Turcotte y E. R. Oxburgh en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 28, parte 1, págs. 29-42; abril 12, 1967.

CONVENCTION IN THE EARTH'S MANTLE: TOWARDS A NUMERICAL SIMULATION. D. P. McKenzie, J. M. Roberts y N. O. Weiss en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 62, parte 3, págs. 465-538; febrero 11, 1974.

ON THE INTERACTION OF TWO SCALES OF CONVECTION IN THE MANTLE. Frank M. Richter y Barry Parsons en *Journal of Geophysical Research*, vol. 80, n.º 17, págs. 2529-2541; junio 10, 1975.

CELULAS VISUALES EN EL PUENTE CEREBRAL

RECEIVING AREAS OF THE TACTILE, AUDITORY, AND VISUAL SYSTEMS IN THE CEREBELLUM. Ray S. Snider y Averill Stowell en *Journal of Neurophysiology*, vol. 7, n.º 6, págs. 331-357; noviembre, 1944.

AFFERENT IMPULSES TO THE CEREBELLAR HEMISPHERES FROM THE CEREBRAL CORTEX AND CERTAIN SUBCORTICAL NUCLEI: AN ELECTRO-ANATOMICAL STUDY IN THE CAT. Jan Jansen, Jr., en *Acta Physiologica Scandinavica*, vol. 41, suplemento 143; 1957.

TELECEPTIVE COMPONENTS OF THE CEREBELLAR FUNCTION. Ettore Fadiga y Giulio Pupilli en *Physiological Reviews*, vol. 44, n.º 3, págs. 432-486; julio, 1964.

HECHURADO DE BANDAS METALICAS

TECHNIQUES OF PRESSWORKING SHEET METAL: AN ENGINEERING APPROACH TO DIE DESIGN. Donald F. Eary y Edward A. Reed. Prentice-Hall, Inc., 1958.

HOW TO RATE STRETCH FORMABILITY OF SHEET METALS. Amit K. Ghosh en *Metal Progress*, vol. 107, n.º 5, págs. 52-54; mayo, 1975.

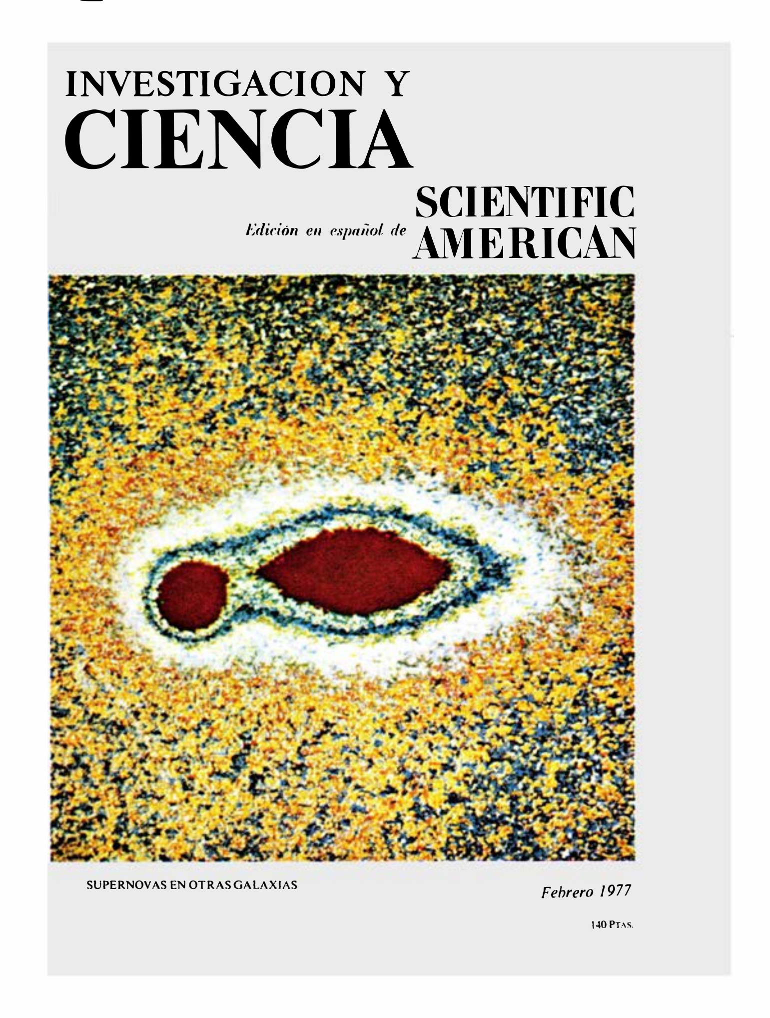
SIMPLE TECHNIQUE FOR DETERMINING FORMING LIMIT CURVES. Siegfried S. Hecker en *Sheet Metal Industries*, vol. 52, n.º 11, págs. 671-676; noviembre, 1975.

JUEGOS MATEMATICOS

THE UBIQUITOUS NUMBER FIVE. I. A. Barnett en *The Mathematics Teacher*, vol. 61, n.º 4, págs. 433-434; abril 1968.

RECURSIVELY GENERATED PERIODIC SEQUENCES. R. P. Kurshan y B. Gopinath en *Canadian Journal of Mathematics*, vol. 26, n.º 6, págs. 1356-1371; diciembre, 1974.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



EL PROCESAMIENTO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR, William P. Bebbington

La economía del poder de fisión podría incrementarse si se procesara el combustible empleado para separar los productos de la fisión y el plutonio y recuperar el uranio. La industria necesaria para tal empeño no existe todavía en Estados Unidos.

POSEFECTOS NEGATIVOS EN LA PERCEPCION VISUAL, Olga Eizner y Michael C. Corballis

Advertiremos uno de ellos si miramos con fijeza una cascada de agua durante un breve período de tiempo y luego apartamos la vista de ella; nos dará la impresión de que el panorama circundante se mueve hacia arriba. El estudio de estas ilusiones proporciona información sobre los sistemas perceptivos.

HELIO 3 SUPERFLUIDO, N. David Mermin y David M. Lee

A una temperatura de unas pocas milésimas de grado sobre el cero absoluto este isótopo de helio es capaz de fluir a través de poros muy pequeños sin rozamiento y presenta efectos magnéticos curiosos.

EL CONTROL DE LOS MOVIMIENTOS DE MARCHA, Keir Pearson

Experimentos muy recientes ponen de manifiesto que el mecanismo por el cual el sistema nervioso genera los movimientos de las extremidades durante la marcha es fundamentalmente el mismo en todos los animales.

SUPERNOVAS EN OTRAS GALAXIAS, Robert P. Kirshner

Estos cataclismos estelares ocurren en una galaxia aproximadamente cada cincuenta años.

COMO ATACAN LOS VIRUS A LAS CELULAS HOSPEDANTES, Allan M. Campbell

Algunos virus pueden coexistir apaciblemente con las células que los hospedan durante largo tiempo, incorporando sus propios genes en el cromosoma de la célula que los abriga.

DATACION MEDIANTE EL ESTUDIO DE HUELLAS DE FISION, J. D. Macdougall

La fisión espontánea de trazas de uranio deja en muchos minerales unas huellas que informan sobre la edad de éstos.

LA PRODUCTIVIDAD DE PRADOS MEDITERRANEOS, Arturo Caballero, Francisco Gil y Miquel Berbel

Una aplicación racional de técnicas basadas en el comportamiento de pratenses de clima templado, cultivadas en zona mediterránea, aproxima las producciones reales netas a las potenciales máximas.

